

Disseny i implementació de controladors d'estabilitat en una maqueta de portacontenidors mitjançant càlcul numèric

Treball Final de Grau



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Treball realitzat per:
Albert Pascual Rodrigo

Dirigit per:
Rosa M. Fernández Cantí
Sergio Romero Lafuente

Grau en Tecnologies Marines

Barcelona, 9 de febrer de 2018

Departament de Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica
Industrial (ESAI)



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Facultat de Nàutica de Barcelona

Full de cortesia

Agraïments

A Álvaro Calvo i Marc Domínguez per ensenyar-me tot el que sabien de la maqueta.

Sobretot a Rosa M. Fernández i Sergio Romero perquè sense vosaltres no hauria començat, avançat i culminat aquest projecte.

A tots els que m'heu ajudat, aconsellat i visitat per interessar-vos i acompanyar-me en aquest projecte.

Especial menció a companys i amics.

Resum

Aquest projecte treballa sobre la qüestió de poder controlar una planta, en aquest cas una maqueta d'un portacontenidors, mitjançant la implementació d'un control dinàmic multivariable. Per poder aconseguir aquesta meta ha estat necessari aconseguir una comunicació eficaç entre el PLC, el controlador *Simulink*, un servidor entremig OPC i la pantalla SCADA.

La primera part treballa físicament sobre la maqueta per actualitzar els sensors que permeten recollir les dades i aconseguir un feedback de qualitat que permeti un control molt més precís.

La segona part és l'inici de la creació del control dinàmic. L'obtenció dels models físics que permeten reproduir la maqueta és la part bàsica de tot control automàtic.

La tercera part consisteix en la creació i millora del controlador per optimitzar-lo i aconseguir que el controlador respongui a tots els nostres requeriments. En un primer nivell es demana que controli l'escora i la mantingui a 0°, en un segon nivell es diferencien els tancs segons el seu efecte sobre l'escora i l'últim nivell treballa sobre evitar al màxim la recollida d'aigua de mar o el seu abocament si no es necessari.

La quarta part explica la solució trobada per connectar i compartir dades entre PLC i altres dispositius, en aquest cas el controlador programat amb *Simulink*. D'aquesta forma s'aconsegueix un controlador òptim sense les limitacions d'un PLC.

La cinquena part està relacionada amb la interfície gràfica: els mètodes de control manual sobre la maqueta i la presentació de la informació sobre les accions del controlador sobre el PLC. Per així donar sempre a l'usuari el control màxim sobre la maquinària de la maqueta.

La sisena i última part és el recull de la informació generada durant la creació d'aquest projecte, en format d'annex que permetrà conèixer la part més exhaustiva de tots els apartats anteriors. Servirà com a base per nous projectes per facilitar la feina a futures ampliacions.

Menció apart del sisè apartat és la creació dels esquemes hidràulics i elèctrics de la maqueta, seguint els requisits de la indústria per poder fer un seguiment dels senyals enviats i rebuts per tot el sistema.

El resultat és una maqueta on s'ha implementat un sistema de programari que aconsegueix la comunicació efectiva entre dispositius. Aquesta comunicació permet el control automàtic de la seva escora per estabilitzar la maqueta davant de pertorbacions.

Abstract

This project works on the question of being able to control a plant, in this case a model of a containership, through the implementation of a multivariable dynamic control. In order to achieve this goal, it was necessary to accomplish effective communication between the PLC, the Simulink controller, an OPC server and the SCADA screen.

The first part works physically on the model to update the sensors that allow picking the data and achieving a high quality feedback that allows a much more accurate control.

The second part is the beginning of the dynamic control. Obtaining physical models that allow the simulation of the model is the basic part of any automatic control.

The third part consists in the creation and improvement of the controller to optimize it and get the controller to respond to all our requirements. At first level, is necessary to control the heel and keep it at 0 degrees, in a second level the tanks are differentiated from each other according to their effect on the ship. The last level works on avoiding the maximum water collection of the sea or dumping it, if it is not necessary.

The fourth part explains the solution found to connect and share data between the PLC and other devices, in this case the controller programmed with Simulink. In this way, an optimal controller is achieved without the limitations of a PLC.

The fifth part is related to the graphical interface: the methods to show a manual control of the ship and the presentation of the information about the actions that the controller is doing. In order to give the user maximum control over the machinery of the model.

The sixth and last part is a collection of the information generated during the creation of this project, in an annex format that will allow you to know the most exhaustive part of all the previous sections. It will serve as a basis for new projects to facilitate work in future enlargements.

Mention apart from the sixth section is the creation of the hydraulic and electrical schematics of the model, following the requirements of the industry to be able to track the signals sent and received throughout the system.

The result is a model where a software system has been implemented that achieves effective communication between devices. Moreover, this communication allows the automatic control of its heel to stabilize the model from disturbances.

Taula de continguts

Agraïments	ii
Resum	iii
Abstract	iv
Taula de continguts	v
Llistat d'il·lustracions i imatges	vii
Llistat de taules.....	viii
Llistat de gràfics.....	ix
 Capítol 1. Introducció.....	 1
1.1. Motivació i abast	1
1.2. Objectiu del treball	2
1.3. Organització de la memòria	3
Capítol 2. Actualització de la maqueta i posada en marxa	4
2.1. Actualització dels sensors.....	4
2.1.1. Sensor d'ultrasons	4
2.1.2. Acceleròmetre	5
2.2. Cablejat actual dels sensors	6
Capítol 3. Obtenció del model	7
3.1. Estructura del model	7
3.1.1. Models dels tancs	7
3.2. Desestimació dels sensors de nivell als tancs.....	13
Capítol 4. Disseny del controlador.....	16
4.1. Configuració de control	16
4.2. Control en llaç tancat simple	16
4.3. Introducció del control en llaç tancat amb condicionants	19
4.4. Forçar l'entrada dels tancs en els extrems.....	21
4.5. Descartar l'estratègia	24
4.6. Canvi d'estratègia.....	25
4.6.1. Subsistema de control	25
4.6.2. Control dels tancs i l'escora.....	26
4.7. Comprovació de l'efectivitat del model complet en simulació	27
Capítol 5. Programació del controlador i l'SCADA	30
5.1. Adaptació del controlador per comunicar-lo amb el servidor OPC	30

5.2.	Creació i configuració del servidor OPC	31
5.3.	Codi del PLC pel control automàtic via OPC	32
5.4.	Codi del PLC pel control manual via SCADA	33
5.5.	Programació de l'SCADA.....	34
5.5.1.	Pantalla d'informació	34
5.5.2.	Pantalla de control manual	35
Capítol 6.	Conclusions.....	40
	Referències i Bibliografia	42
Annex – Manual de Servei.....		1
A1.	Estat inicial.....	1
1.1.	Vàlvules	1
1.2.	Trencament de la bomba de llast.....	2
1.3.	Sensor de nivell defectuós	3
1.4.	Fuita d'aigua	3
1.5.	Tancs de doble fons.....	3
A2.	Renovació i actualització	4
2.1.	Sensor d'ultrasons pel francbord	4
2.1.1.	Elecció del sensor d'ultrasons	4
2.1.2.	Programació del sensor d'ultrasons	5
2.1.3.	Instal·lació del sensor d'ultrasons	5
2.1.4.	Connexió des de l'Arduino al PLC	6
2.2.	Sensor acceleròmetre pel trimat i escora	6
2.2.1.	Elecció del sensor acceleròmetre	7
2.2.2.	Programació de l'acceleròmetre	8
2.2.3.	Instal·lació de l'acceleròmetre	8
2.2.4.	Connexió des de l'Arduino al PLC	9
2.3.	Esquemes d'ambos sensors i la connexió Arduino-PLC	10
2.4.	Programació de l'Arduino.....	11
A3.	Posada en marxa dels nous sensors	14
A4.	Esquemes hidràulics i elèctrics	16

Llistat d'il·lustracions i imatges

Il·lustració 1 – MV Cougar Ace després de l'incident [II].....	1
Il·lustració 2 – Sensor HC-SR04 [IV]	5
Il·lustració 3 – MPU6050 [VI].....	5
Il·lustració 4 – Cablejat dels sensors a l'Arduino i al PLC.....	6
Il·lustració 5 – Representació d'un tanc	7
Il·lustració 6 – Distribució dels tancs de llast.....	7
Il·lustració 7 – Funció de transferència tipus	10
Il·lustració 8 – Funció de transferència tipus amb escora inicial.....	10
Il·lustració 9 – Funció de transferència de la planta <i>Buidar Babord 2</i>	11
Il·lustració 10 – Control en llaç tancat per un tanc tipus.....	16
Il·lustració 11 – Primera aproximació de la planta	17
Il·lustració 12 – Cotes del control condicionat	19
Il·lustració 13 – Aplicació de la lògica condicionada amb blocs de lògica booleana	20
Il·lustració 14 – Planta amb els blocs d'activació per tancs al 100%.....	22
Il·lustració 15 – Planta amb els condicionants lògics de tancs al 0% i 100%.....	24
Il·lustració 16 – Subsistema de control pels tancs #1.....	25
Il·lustració 17 – Controlador dels tancs #1 i #2 amb transvasament	26
Il·lustració 18 – Detall de la connexió Simulink-OPC.....	30
Il·lustració 19 – Controlador complet amb la comunicació via OPC	31
Il·lustració 20 – Detall de les variables que comparteix el servidor OPC	32
Il·lustració 21 – Exemple de control d'un tanc via OPC.....	32
Il·lustració 22 – Exemple de control d'un tanc amb transvasament	33
Il·lustració 23 – Programació que controla les vàlvules manualment.....	33
Il·lustració 24 – Pantalla d'informació general.....	34
Il·lustració 25 – Exemple d'informació que es mostra sobre un tanc	35
Il·lustració 26 – Pantalla de control manual.....	36
Il·lustració 27 – Selecció del control manual	36
Il·lustració 28 – Operativa de vàlvules a partir dels rètols d'Omplir, Buidar i Transvasar	37
Il·lustració 29 – Seguretats de la bomba de llast.....	37
Il·lustració 30 – Botons de control del PLC i sortida de l'SCADA	37
Il·lustració 31 – Pantalla emergent on informa de l'estat del PLC i permet activar-lo.....	38
Il·lustració 32 – Pantalla emergent d'ajuda.....	38
Il·lustració 33 – Desactivació de totes les vàlvules i de la bomba al sortir del mode manual.....	39
Il·lustració 34 – Detall de les vàlvules.....	2
Il·lustració 35 – Sensor de nivell dels tancs [VIII]	3
Il·lustració 36 – Funcionament del sensor d'ultrasons.....	5
Il·lustració 37 – Instal·lació del sensor d'ultrasons.....	6
Il·lustració 38 – Antic sensor d'escora.....	7
Il·lustració 39 – Funcionament acceleròmetre.....	8
Il·lustració 40 – Ubicació de l'acceleròmetre dins del castell de popa.....	9
Il·lustració 41 – Cablejat de l'Arduino per connectar els sensors i el PLC	11

Llistat de taules

Taula 1 – Comparativa de resultats teòrics i pràctics.....	12
Taula 2 – Variables transmeses pel servidor OPC	31
Taula 3 – Programació Arduino	13
Taula 4 – Relació de valors d'escora entre la realitat, l'Arduino i el PLC	14
Taula 5 – Relació de valors de trimat entre la realitat, l'Arduino i el PLC	14
Taula 6 – Comparació de valors entre sensors d'escora i trimat	15

Llistat de gràfics

Gràfic 1 – Representació de l'ompliment del tanc lateral de babord #2	8
Gràfic 2 – Representació del buidatge del tanc lateral de babord #2	9
Gràfic 3 – Representació del buidatge del tanc lateral d'estribord #2	9
Gràfic 4 – Representació del buidatge del tanc ER2 amb Simulink	11
Gràfic 5 – Gràfic de dispersió omplint el tanc de babord #2	13
Gràfic 6 – Gràfic de dispersió buidant el tanc d'estribord #2	14
Gràfic 7 – Gràfic de dispersió omplint el tanc d'estribord #1	14
Gràfic 8 – Relació temporal del buidatge del tanc d'estribord #1	15
Gràfic 9 – Comportament de la primera planta (Escora/Pertorbació)	18
Gràfic 10 – Comportament de la primera planta (4 Tancs)	18
Gràfic 11 – Comportament amb la introducció de la lògica condicionada (Escora/Pertorbació)	20
Gràfic 12 – Comportament amb la introducció de la lògica booleana (4 Tancs)	21
Gràfic 13 – Comportament de l'escora quan s'activen els tancs fora del rang (Escora/Pertorbació)	22
Gràfic 14 – Comportament dels tancs quan s'activen fora del rang d'escora (4 Tancs)	23
Gràfic 15 – Comportament dels tancs amb pertorbacions màximes de 10°	27
Gràfic 16 – Comportament de l'escora amb pertorbacions màximes de 10°	28
Gràfic 17 – Comportament del controlador amb pertorbacions de 15°	29

Capítol 1. Introducció

1.1. Motivació i abast

En l'àmbit de l'estabilitat de les embarcacions de la marina mercant, el control del llast és un dels factors no constructius més decisius en la capacitat del buc de desenvolupar-se en diferents situacions de càrrega i garantir la seguretat de la tripulació, de la càrrega i del vaixell.

Les operacions d'estiba es dissenyen per minimitzar l'efecte de la càrrega sobre l'estabilitat del buc, però no sempre és possible optimitzar el procediment de càrrega per a que el resultat sigui estable. Per aquest motiu el procediment de llast és el següent factor a tenir en compte a l'hora d'assegurar l'estabilitat.

La diferència entre bucs de passatge i bucs mercants resideix en el tipus de navegació i el tipus de càrrega. En els mercants, el llast s'utilitza per equilibrar el vaixell enfront les pertorbacions creades per la càrrega mentre que en els bucs de passatge s'utilitza per oferir una bona navegació als passatgers.

Per una banda, en el cas dels bucs mercants, la història ens mostra que una manipulació errònia del llast pot provocar accidents greus, per exemple, el que va patir el vaixell *MV Cougar Ace* [I] el 2005. En conseqüència, per evitar errors humans és important comptar amb un control de llast automàtic i efectiu durant la càrrega i per realitzar canvis de llast durant la navegació.



Il·lustració 1 – MV Cougar Ace després de l'incident [II]

Per l'altra banda, en el cas dels vaixells de passatge una bona navegació és crucial per al negoci. Si els passatgers experimenten una navegació poc confortable, acabaran per no repetir o per canviar de companyia. Per aquest motiu existeixen mètodes per contrarestar els efectes dels temporals fent servir tancs de llast especialitzats amb una resposta ràpida per compensar les inèrcies provocades pels vents i ones.

Així doncs, el camp d'aplicació dels sistemes de control de llast no es redueix a l'estabilització del buc a port durant l'estiba, sinó que amb diferents configuracions de tancs es poden aconseguir respostes ràpides a temporals en navegació.

Atès que en navegació els sistemes de llast no s'utilitzen per a vaixells de càrrega, el present treball és centrarà en l'anàlisi, disseny i implementació del sistema de control del llast en una maqueta de portacontenidors durant les maniobres de càrrega o descàrrega en port.

1.2. Objectiu del treball

El punt de partida es la feina realitzada pels companys *Álvaro Calvo Bosque* i *Marc Domínguez Torres* al TFG "*Control de la estabilidad de un modelo de buque portacontenedores en operaciones de estiba*" (2015) [14] on van implementar una maqueta de buc portacontenidors d'un metre d'eslora, amb 12 tancs de llast, dues vàlvules per tanc i una bomba de llast, amb l'objectiu de realitzar estudis d'estabilitat.

L'objectiu global del present treball és l'ampliació i la millora de la instrumentació de la maqueta per tal de portar a terme (1) l'obtenció i validació d'un model analític multivariable del comportament dinàmic del vaixell, (2) el disseny d'un sistema de control òptim en base al model anterior i (3) implementació i validació experimental del controlador.

Així, el present treball es centra en l'anàlisi de la resposta dinàmica dels tancs de llast i el seu efecte sobre l'estabilitat del buc i la seva operativa, i el disseny d'un controlador òptim en el sentit que permeti fer la maniobra de llast de la forma més efectiva, en el menor temps possible i minimitzant les hores de funcionament de l'equipament de llast.

Per aconseguir aquest objectiu el treball es subdivideix en els següents objectius parcials:

- Com que en el moment d'iniciar el present treball, la maqueta no està operativa i tampoc compleix els requisits tècnics necessaris per començar a operar amb ella, cal una feina exhaustiva de millora dels sensors abans d'iniciar les proves experimentals. En concret, cal substituir els potenciòmetres actuals per sensors molt més ràpids i precisos: un acceleròmetre-giròscop (per a la mesura de l'escora i trimat) i sensors d'ultrasons (per a la mesura del calat). Atès que les característiques dels senyals de sortida d'aquests dispositius són incompatibles amb les entrades de l'autòmata o PLC (*Programmable Logic Controller*) de control disponible, cal dissenyar i implementar una etapa intermèdia de condicionament de senyal basada en Arduino.
- Com a resultat del punt anterior, s'estableix també com a objectiu específic l'elaboració d'un Manual de Servei per a futurs estudiants que vulguin treballar amb la maqueta, indicant tots els canvis d'instrumentació i refent i completant els esquemes hidràulics i elèctrics.
- Per tal de permetre el control manual per realitzar les proves i recollir les màximes dades possibles cal dissenyar un sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) amb l'ajut del *software* WinCC del TIA Portal de Siemens, que reculli les dades de l'autòmat.
- Amb l'ajut del MATLAB/SIMULINK es planteja identificar un model analític del comportament dinàmic de la maqueta (models individualitzats del nivell dels tancs i estabilitat global del buc) a partir de les dades experimentals recollides pel sistema SCADA. Per tal de portar a terme la validació experimental del model, cal implementar la transferència de dades en temps real entre el MATLAB/SIMULINK, el sistema SCADA i el PLC amb l'ajut d'un servidor OPC, *Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control*. Els models matemàtics han de ser el més fidels possibles al comportament real, amb la qual cosa cal estimar en temps real les sortides dels sensors defectuosos per poder utilitzar les seves dades com a feedback de la planta.
- En base al model del comportament dinàmic de la maqueta cal dissenyar un controlador multivariable òptim, sintonitzar els seus paràmetres amb l'ajut del SIMULINK i verificar el seu correcte funcionament per simulació. El controlador ha de tenir en compte les especificacions habituals dels sistemes de llast reals.

- Finalment, cal programar al PLC el controlador dissenyat en TIA Portal i, una vegada el control està operatiu, crear un SCADA per poder controlar i monitoritzar el comportament del sistema de control, coneixent en temps real les accions del controlador i els seus resultats immediats. També cal una pantalla de control manual i així poder modificar el nivell de llast dels tancs per poder fer proves posteriors o per comprovar el funcionament del controlador.

1.3. Organització de la memòria

La resta de la memòria està organitzada en format cronològic i separada en capítols seguint criteris tècnics.

D'aquesta manera, en el Capítol 2 es presenta la maqueta, en concret es descriu el seu estat inicial, es detalla la incorporació dels nous sensors i es descriu l'actualització del *hardware* amb la incorporació de l'Arduino al sistema anteriorment muntat.

El Capítol 3 dóna cos a aquest projecte i detalla l'obtenció del model matemàtic que descriu el comportament dinàmic de la maqueta. És la base sobre la que es treballarà en aquest projecte, ja que sense el model matemàtic corresponent les estratègies de control que es volen implementar no serien possibles. Aquest apartat està classificat segons l'ordre d'obtenció dels models on es descobreix que els sensors de nivell dels tancs no poden fer-se servir contra pronòstic per la seva ineficàcia.

En el Capítol 4 s'aborda el problema del disseny del controlador, aquí és on a partir dels models obtinguts es dissenya un control multivariable que sigui precís (error nul en règim permanent a pertorbacions tipus graó) i sigui òptim en el sentit de minimitzar l'escorça i el trimat en el mínim temps d'establiment. Seguint l'apartat anterior, com que durant el procés d'obtenció dels controladors s'ha hagut de modificar el model, aquí s'explica el raonament que porta a aquestes conclusions.

Seguidament, en el Capítol 5, per posar en pràctica la feina de simulació i obtenció dels controladors, es procedeix a sincronitzar la feina realitzada matemàticament amb la feina física de la maqueta. La unió de la programació i la maqueta física és la culminació del treball d'obtenció dels models i els controladors que assegurin el seu funcionament. Per poder observar aquesta unió s'explicarà la creació de les pantalles SCADA que permeten la operació dels controladors i la maqueta de forma manual. En aquest capítol es presenten els resultats de les proves experimentals per tal de comprovar si les aproximacions realitzades són correctes. Al no poder fer servir els nivells dels tancs de forma experimental es prenen dades de la pròpia simulació, i aquest factor influeix en el resultat final del projecte.

Finalment, al Capítol 6 es presenten les principals conclusions d'aquest treball i s'apunten possibles línies futures d'investigació.

Aquesta memòria disposa d'un Annex que constitueix el Manual de Servei desenvolupat per a que les persones que en un futur tinguin que treballar amb la maqueta no es trobin amb les mateixes dificultats que s'han hagut de superar en el present treball.

Capítol 2. Actualització de la maqueta i posada en marxa

La realització d'aquest TFG té com a base una maqueta d'un portacontenidors, que va ser realitzada fa més d'un any per uns companys de la Facultat. Des de la seva presentació la maqueta va ser desmuntada, en el sentit de que es van desconnectar les canalitzacions de l'aigua de llast i es va buidar tota l'aigua del tanc. Després de tant de temps li calia manteniment, per desencallar les vàlvules que s'havien quedat bloquejades per la cal i canviar la bomba de llast degut a la seva fragilitat i als problemes que ocasionava durant les proves inicials.

Com que es van substituir alguns elements es va decidir actualitzar i refer la documentació relacionada amb els esquemes elèctrics i hidràulic per facilitar la feina a possibles millores posteriors (veure Manual de Servei a l'Annex).

2.1. Actualització dels sensors

Els sensors inicials de la maqueta eren de dos tipus, dos potenciómetres amb un plomall per detectar el trimat i l'escora, i sensors de nivell als tancs número 1 i 2, a babords i estribord. Els sensors de nivell dels tancs estan inclosos a l'estructura interna dels tancs, i no poden ser canviats, però els sensors d'escora i trimat sí que poden ser anul·lats. Es va procedir a incloure un acceleròmetre per determinar el trimat i l'escora i poder determinar la inclinació en graus fent servir la gravetat terrestre. Finalment es va introduir un sensor d'ultrasons a la popa del vaixell per conèixer el calat del vaixell en tot moment i així poder determinar un punt òptim de treball a l'hora de fer l'estiba.

Els sensors nous que s'han instal·lat no són compatibles amb el PLC directament, per això es va fer servir la plataforma Arduino com a camí intermedi entre els sensors i el PLC. Es connecten els sensors, es fa la lectura i el tractament de les dades amb Arduino i les dades finals són transmeses a la tarja d'entrades analògiques del PLC per fer-ho més senzill. El motiu d'aquesta elecció és que els sensors dissenyats per a Arduino són molt més barats i fàcils de trobar que no aquells que estan pensats per plataformes industrials i que poden ser connectats al PLC directament.

2.1.1. Sensor d'ultrasons

Per escollir el sensor d'ultrasons es va optar per un que pogués mesurar la distància entre la coberta principal del vaixell i el nivell de l'aigua sense ser voluminós. Dins de tots els sensors disponibles per Arduino es va escollir un dels més utilitzats, on la documentació i exemples són abundants a internet, així la posada en funcionament seria molt més ràpida. Es va decidir escollir el sensor HC-SR04.

El sensor ultrasònic de rang HC-SR04 proporciona un marge de 2cm a 400cm de mesura sense contacte amb una precisió que pot arribar fins als 3mm. [III]

La programació del sensor va ser extreta d'internet i les línies de codi exactes que s'han fet servir en aquest projecte es poden trobar al Manual de Servei adjunt al TFG (veure Annex).

Per connectar el sensor d'ultrasons al PLC es va optar per fer-ho de forma digital, fent servir diferents cables per cada unitat de distància. Es podria haver optat per un senyal analògic que variés d'amplitud depenent del calat però aquestes entrades analògiques les fa servir l'acceleròmetre. Com que el calat de la maqueta no afecta molt a la seva estabilitat, donat la seva construcció i la poca capacitat de càrrega que té, es determina que és una variable de poca importància i es tractarà amb menys precisió que l'escora.

Així doncs es connecten els cables directament de les sortides de l'Arduino a les entrades digitals del PLC, i segons quina entrada del PLC estigui activada, marcarà una distància concreta en el calat.



Il·lustració 2 – Sensor HC-SR04 [IV]

2.1.2. Acceleròmetre

L'elecció de l'acceleròmetre és la més complicada, donat que l'estratègia de control que volem fer servir necessita d'un *feedback* molt precís per poder controlar el procés d'estiba i que els valors de trimat i escora es mantinguin els més propers a zero. Qualsevol variació o error en la presa de dades poden fer que el control no sigui totalment estable. Veient la poca fiabilitat que tenia el sensor anterior, es va decidir escollir un sensor de tipus acceleròmetre, que detectant les diferents components de la gravetat terrestre, pogués determinar la inclinació en els tres eixos. La precisió d'aquest sensor és de dècimes de grau, així que té una resolució molt gran comparat amb les altres alternatives.

De manera anàloga a l'elecció del sensor d'ultrasons, es va escollir un acceleròmetre compatible amb Arduino que tingués una gran base de documentació i exemples a internet. Es va optar pel *Giroscopi i acceleròmetre MPU6050*.

El sensor MPU-6050 conté un acceleròmetre MEMS (MicroElectroMechanicalSystem) i un giroscopi MEMS en un sol xip. És molt precís, ja que conté 16 bits de hardware de conversió analògica a digital per a cada canal. Per tant, captura el canal x, y, i z alhora. El sensor utilitza el bus I2C per interconnectar-lo amb l'Arduino [V]

La programació del sensor va ser extreta d'internet i les línies de codi exactes que s'han fet servir en aquest projecte es poden trobar al Manual de Servei adjunt al TFG (veure Annex).

Per connectar l'Arduino al PLC, en aquest cas sé que es fan servir les entrades analògiques que es feien servir anteriorment pels mateixos sensors. Es fa servir el mode PWM (*Pulse Width Modulation*) dels pins de l'Arduino per simular una sortida analògica entre 0 i 5 volts que serà llegida pel PLC com a entrada analògica. El motiu de fer servir una entrada analògica és que ens dóna molta precisió, en aquest cas el límit l'establím amb el rang de graus que volem llegir, i la capacitat de les sortides de l'Arduino. Les sortides en format PWM només poden donar valors entre 0 i 255, que equivalen a 5V de màxima, per tant només tenim 255 lectures possibles. Si d'escora llegirem de 25° a babord fins a 25° a estribord, això ens dóna una precisió mínima de:

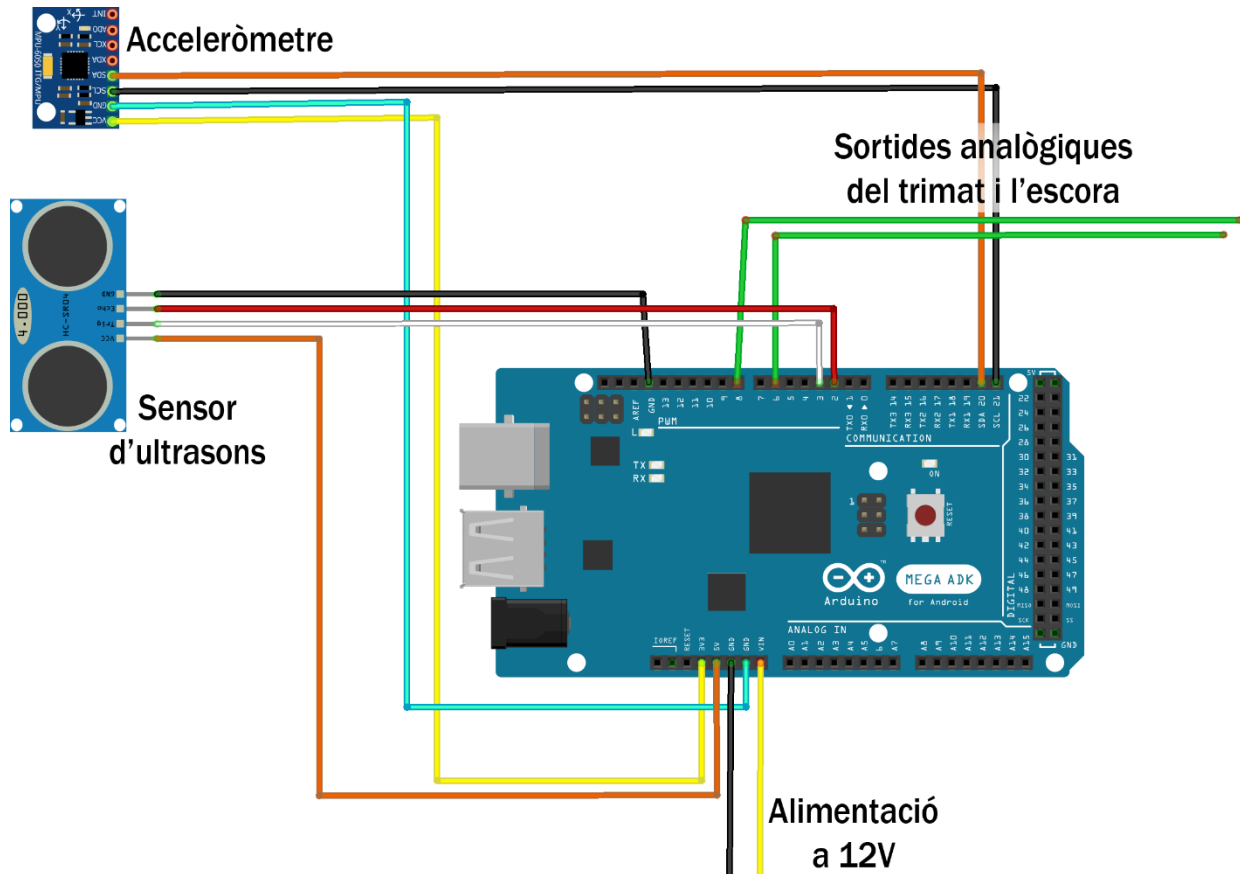


Il·lustració 3 – MPU6050 [VI]

$$\frac{\text{Quantitat de graus a mesurar}}{\text{Valors de sortida}} = \frac{50}{255} = 0.196^\circ \quad (1)$$

2.2. Cablejat actual dels sensors

A l'haver introduït nous sensors, amb una diferència de cablejat respecte als anteriors que estaven instal·lats, s'ha hagut de modificar el cablejat per introduir la placa Arduino i posar com a etapa de condicionament del senyal abans de que els senyals arribin al PLC. A la figura següent es resumeix l'estat final dels sensors, i la seva disposició per a que es tingui una visió més clara de les modificacions que s'han fet.



Il·lustració 4 – Cablejat dels sensors a l'Arduino i al PLC

En aquest esquema no es mostra el cablejat opcional que és necessari per a la recollida de dades que seran mostrades en els següents capítols, ja que no són necessaris pel funcionament normal de l'Arduino, i només s'han fet servir pel procés de recollir les dades durant les proves empíriques amb la maqueta. Per a més informació sobre com reproduir les opcions de cablejat per a la recollida de dades es pot consultar el Manual de Servei adjunt a aquest TFG (veure Annex), on també s'adjunta l'esquema hidràulic i elèctric complet de tot el sistema amb les diferents variants necessàries per reproduir tots els experiments duts a terme.

Capítol 3. Obtenció del model

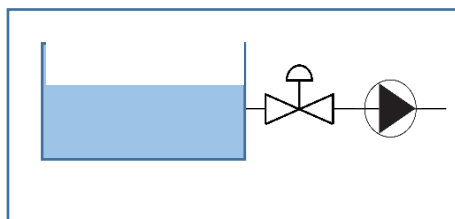
En aquest capítol es descriu el procés d'obtenció i validació del model del comportament dinàmic de la maqueta obtingut a partir de les dades experimentals mesurades amb els nous sensors, recollides per l'Arduino i enviades via PLC a l'ordinador.

3.1. Estructura del model

Per descriure el comportament dinàmic del vaixell (planta) i poder dissenyar un controlador, el primer pas és identificar les entrades, sortides i variables internes que tindrà el model de la planta. S'han d'analitzar quines variables hem de controlar i sobre quines podem actuar. Les dues sortides de la planta seran les dues variables que volem controlar, és a dir, els angles d'escora i trimat mesurats en graus. Les entrades de la planta són les variables sobre les que podem actuar, és a dir, les tensions que governen cadascunes de les vàlvules de cada tanc i la bomba. Les variables internes seran els nivells dels tancs.

3.1.1. Models dels tancs

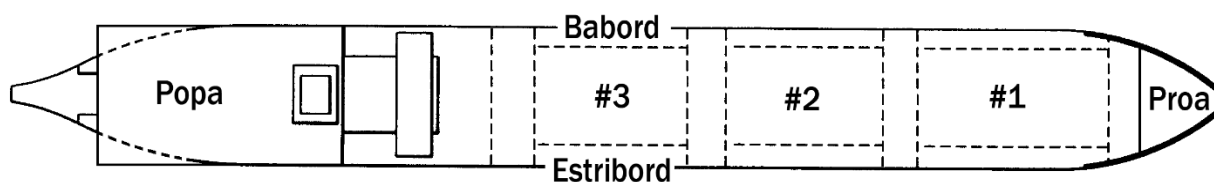
Com que la dinàmica d'emplenament i buidat dels tancs no és simètrica (un mateix tanc no triga el mateix en omplir-se que en buidar-se), s'ha pres per a cada tanc dues funcions de transferència diferents, una per omplir i una altra per buidar. Així dins de cada element de la planta que estigui relacionat amb els tancs, tenim a dins: (1) el tanc, (2) la vàlvula que omple o buida segons toca i (3) la bomba que s'ha d'activar si volem omplir o buidar sigui el tanc que sigui.



Il·lustració 5 – Representació d'un tanc

Amb aquesta aproximació, si tenim 6 tancs laterals i 6 tancs de doble fons, aconseguirem tenir 24 plantes individuals (12 per omplir i 12 per buidar, tot i que més endavant veurem que pels transvasaments caldran noves plantes). Com els tancs de doble fons tenen un impacte menyspreable sobre l'escora i el trimat, comparat amb els seus homòlegs laterals, els descartem per fer el control de l'escora i el trimat. Més endavant es podran utilitzar per modificar lleugerament el calat del vaixell en cas de que sigui necessari.

Per poder obtenir la funció de transferència que pertoca a cada planta (omplir o buidar un tanc) ens toca entendre el funcionament del tanc, les vàlvules i de la bomba. També quins tipus de senyals utilitza el PLC per controlar les vàlvules i la bomba, i quina és la sortida que ens dona la planta.



Il·lustració 6 – Distribució dels tancs de llast

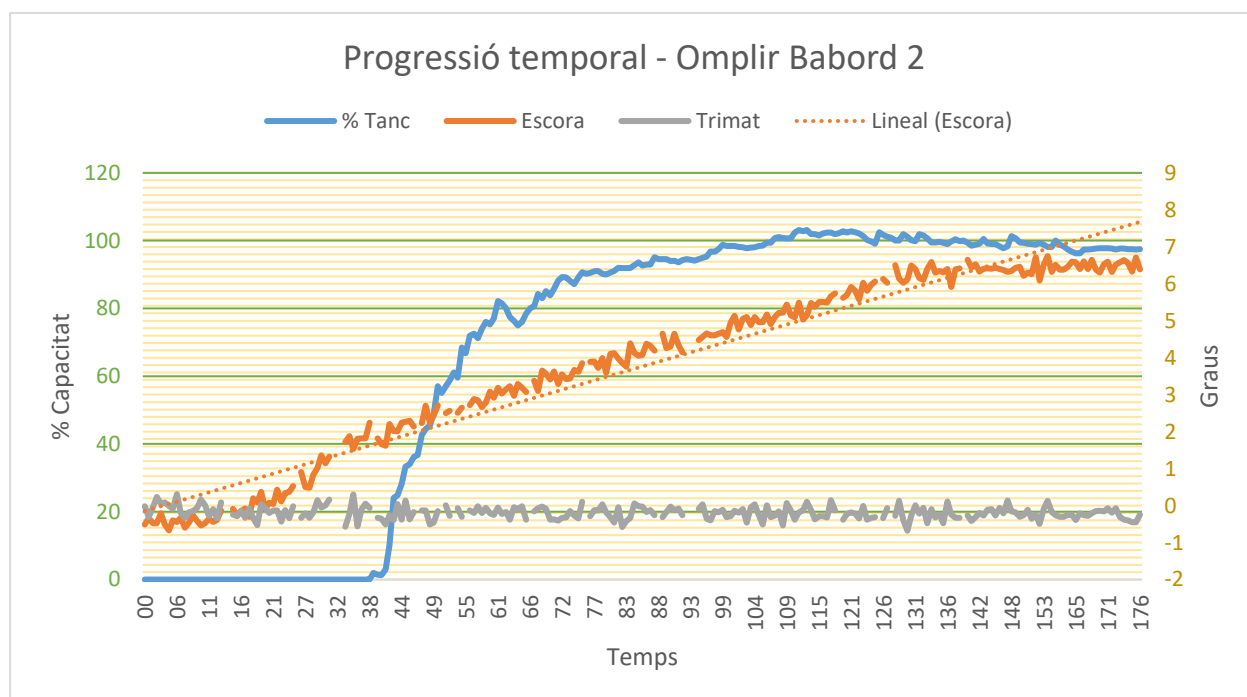
Agafem l'exemple d'omplir un tanc. En el cas dels tancs laterals 1 i 2 tenim lectura de l'escora i el trimat, com també del nivell del tanc. I com a actuadors tenim una vàlvula d'omplir, la vàlvula de la presa de mar

i la bomba. Per simplificar el control de les vàlvules, amb el PLC es pot programar que quan s'activi la vàlvula d'omplir, la bomba i la presa de mar també s'activin. Així que prendrem que només actuem sobre el fet de "omplir el tanc" i aquesta acció actuarà sobre les vàlvules i la bomba necessàries per realitzar aquesta acció. Per resoldre aquesta qüestió n'hi ha prou amb una variable interna al PLC que controli les altres variables de sortida.

Aleshores, ens queda que podem actuar sobre la planta, o no podem actuar i només tenim control sobre la duració del temps. Com a sortida tenim un efecte sobre l'escora, el trimat i sobre el nivell del tanc. Com la sortida del PLC és una senyal digital, de valors 0V o 12V, prenem aquest senyal com un senyal esglaó on controlem la durada d'aquest esglaó, i depenent d'aquesta durada tindrà un efecte més gran o més petit.

Per poder aproximar quin tipus de funció correspon, hem d'obtenir les dades i analitzar-les gràficament per veure quin tipus de sortida ens dona la planta. Per això utilitzem l'Arduino i la comunicació sèrie per llegir totes les dades i recollir-les en documents d'Excel. Es fan un parell de proves per cada tanc, omplint i buidant.

Els resultats que es mostren a continuació són l'exemple d'un únic tanc, en aquest cas l'emplenament del tanc lateral de babord 2, sent els resultats per la resta de tancs extrapolables excepte uns casos que es comentaran més endavant.

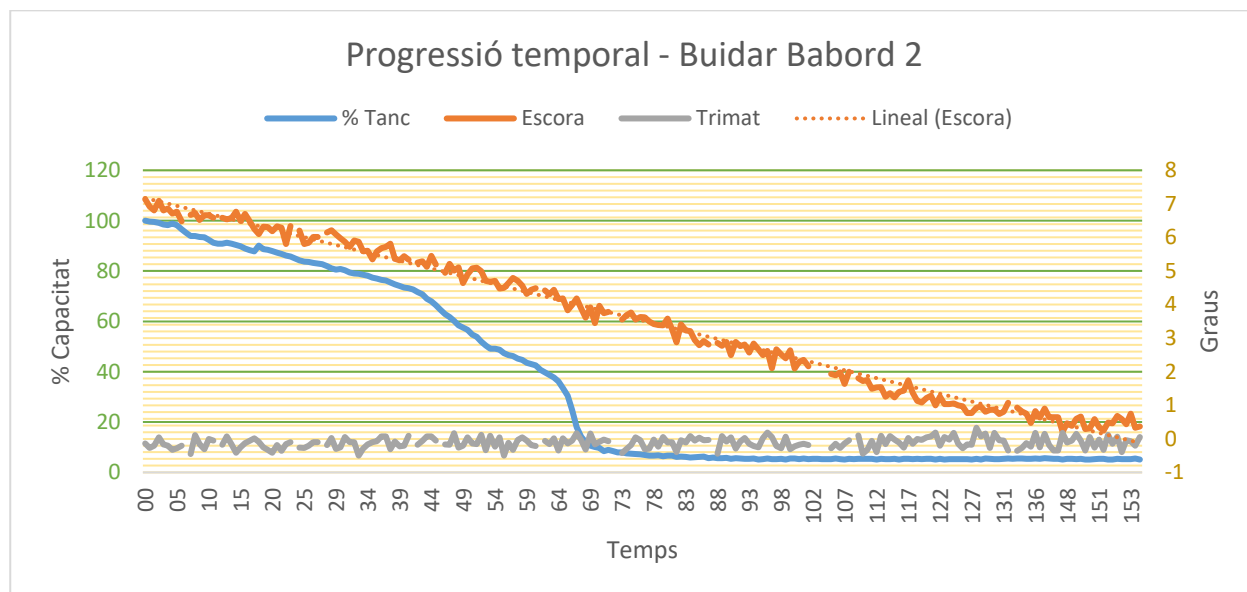


Gràfic 1 – Representació de l'ompliment del tanc lateral de babord #2

En aquest gràfic es representen les dades recollides de l'escora, el trimat i del nivell del tanc al llarg del temps. Pel que fa a la duració del gràfic aquesta és amb la bomba encesa bombejant aigua des del segon 5 aproximadament fins al final. Aquesta diferència de temps és deguda a la impossibilitat de connectar l'Arduino i actuar amb l'SCADA sobre la planta just al mateix temps. Però l'efecte d'aquest retard és mínim i no influeix en els resultats.

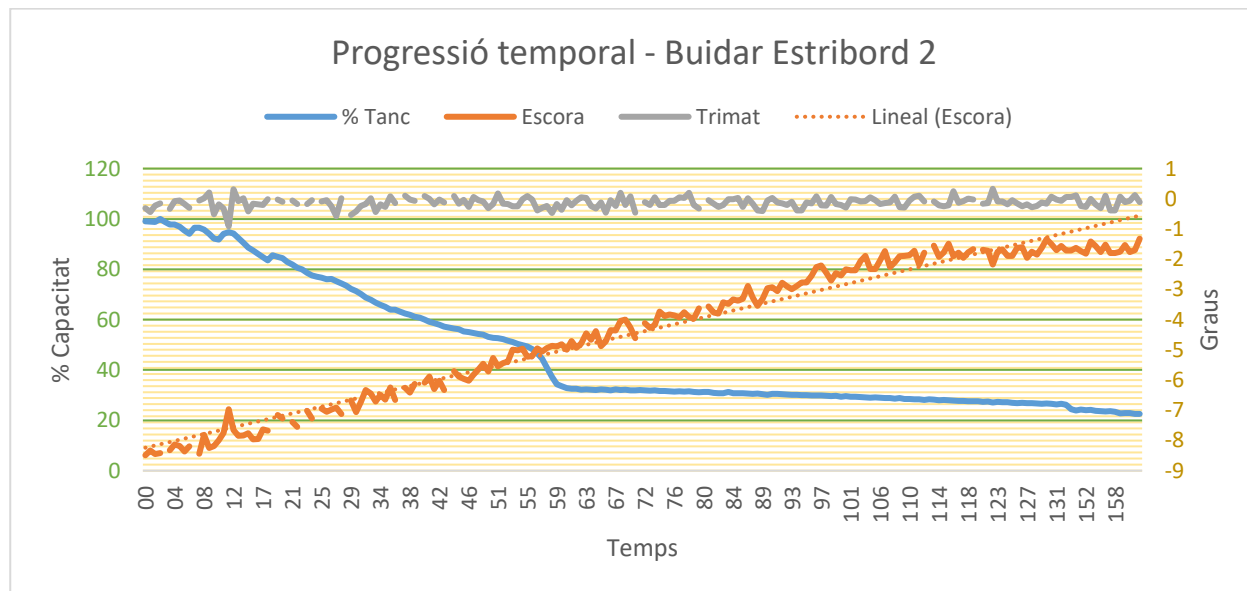
Els resultats que es poden extreure d'aquesta gràfica són molt variants, sent el més sorprenent és la lectura del sensor de nivell del tanc. Que es manté a zero fins al segon 38 on de sobte comença a pujar fins que arriba al 80% en només 20 segons i escaig. I després per assolir el 100% del nivell hem d'esperar uns 40 segons. Això podria tenir sentit si el tanc tingués alguna forma estranya, on la base fos més prima

que la part superior i que el sensor no arribés a la part baixa. Però els tancs tenen una forma molt rectangular que impossibilita aquest comportament. Si observem la gràfica del mateix tanc, però sent buidat observem que la corba de nivell al tanc no correspon a la mateixa.



Gràfic 2 – Representació del buidatge del tanc lateral de babord #2

Com podem veure en aquesta corba de nivell, quan es buida el tanc el nivell respon quasi a una recta gairebé durant tot el procés, excepte pel final que fa una caiguda brusca i ràpida. Sabent per l'efecte a l'escora que el tanc triga prop de 130s aproximadament a buidar-se, sembla estrany que el sensor de nivell detecti 0% als 70s, aproximadament la meitat del temps. Aquest és dels millors resultats obtinguts, en canvi si ho comparem amb el tanc d'estribord 2 veurem com aquests sensors no són gaire fiables.



Gràfic 3 – Representació del buidatge del tanc lateral d'estribord #2

Com que els sensors de nivell no són gaire fiables, i el tipus de controlador que volem aplicar necessita una fiabilitat alta per poder realitzar el control, si els sensors no donen una resposta adequada el control no podrà ser tot el precís que voldríem. Més endavant tractarem de resoldre aquest fet simulant/estimant la resposta del nivell del tanc per a que el controlador tingui una resposta adequada.

La següent observació que podem extreure d'aquestes gràfiques és que l'efecte sobre el trimat és molt petit, per això el control del trimat el realitzarem de forma manual amb el PLC.

Com a darrera conclusió que ens donen aquestes gràfiques és referent a l'escora, que és el que realment volem controlar en aquest projecte. Com podem veure amb les línies de tendència de l'escora, una resposta tipus rampa s'ajusta prou bé a la corba real. Per això modelitzarem la resposta de l'escora a l'entrada esglaó com una rampa.

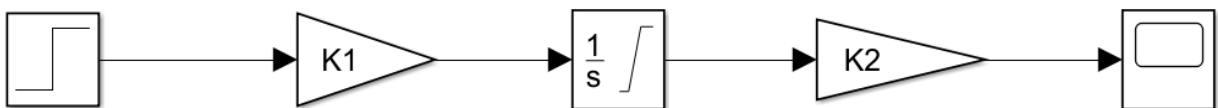
Per una banda hem de simular la resposta del nivell dels tancs a una entrada de tensió tipus graó. La resposta dels tancs presenta comportament integral i per això, a un graó de tensió d'entrada el nivell del tanc augmenta en forma de rampa essent la pendent d'aquesta una constant $K2$. Com que l'escora també té un comportament tipus rampa, veiem que la relació entre el nivell del tanc i l'escora és una constant de proporcionalitat $K1$.

En aquestes gràfiques, i aplicant el sentit comú, els tancs no poden estar mai més plens del 100% ni més buits del 0%. Per tant considerarem una saturació al nivell del tanc que correspongui a aquests valors. Després amb les dades que ens donen aquestes corbes, podem extreure el pendent de la rampa, i la seva duració. Amb aquestes dues dades i sabent que la resposta a l'esglaó és una rampa, podem assumir que la funció de transferència té un integrador on el numerador serà el pendent de la rampa.

$$\frac{K1 \cdot K2}{s} = G(s) \quad \text{on: } K1 = \frac{\text{Temps total}}{100\%}; K2 = \Delta \text{Escora} \quad (2)$$

El temps total a l'equació (2) es refereix als segons que triga en fer un cicle complet, des de que comencem a omplir fins que s'omple al 100%, i ΔEscora a la diferència entre l'escora inicial i l'escora final.

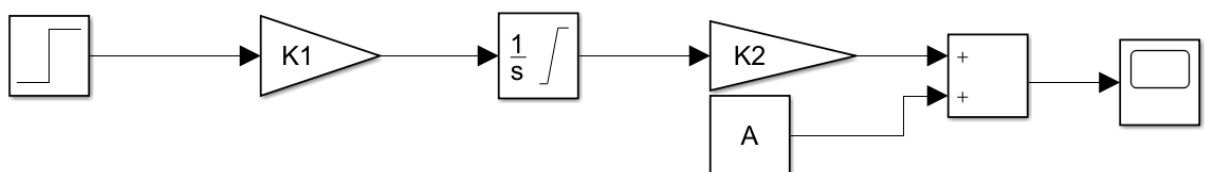
Després, tenint la funció de transferència del nivell del tanc, només hem de fer que els valors corresponguin als de l'escora màxima quan arribi al 100%, així que apliquem el guany que correspongui perquè els resultats siguin els mateixos.



Il·lustració 7 – Funció de transferència tipus

Amb aquesta funció de transferència tipus, $K1$ és el valor del pendent de la corba, després trobem l'integrador pur amb la saturació al 100% de nivell, i per últim el guany $K2$ que farà aproximar-se a l'escora màxima quan el tanc esta ple.

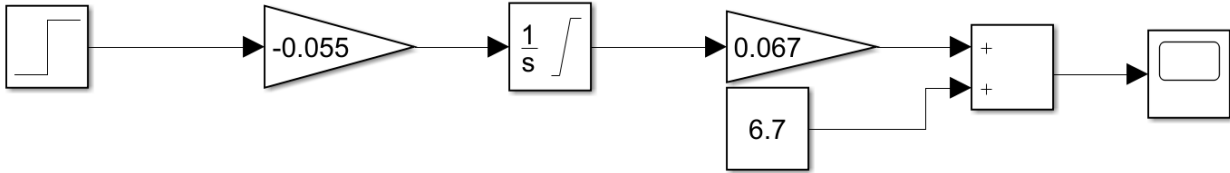
En alguns casos, l'escora inicial a la maqueta no és zero completament, pel que s'ha de modificar i introduir aquest valor abans del resultat final.



Il·lustració 8 – Funció de transferència tipus amb escora inicial

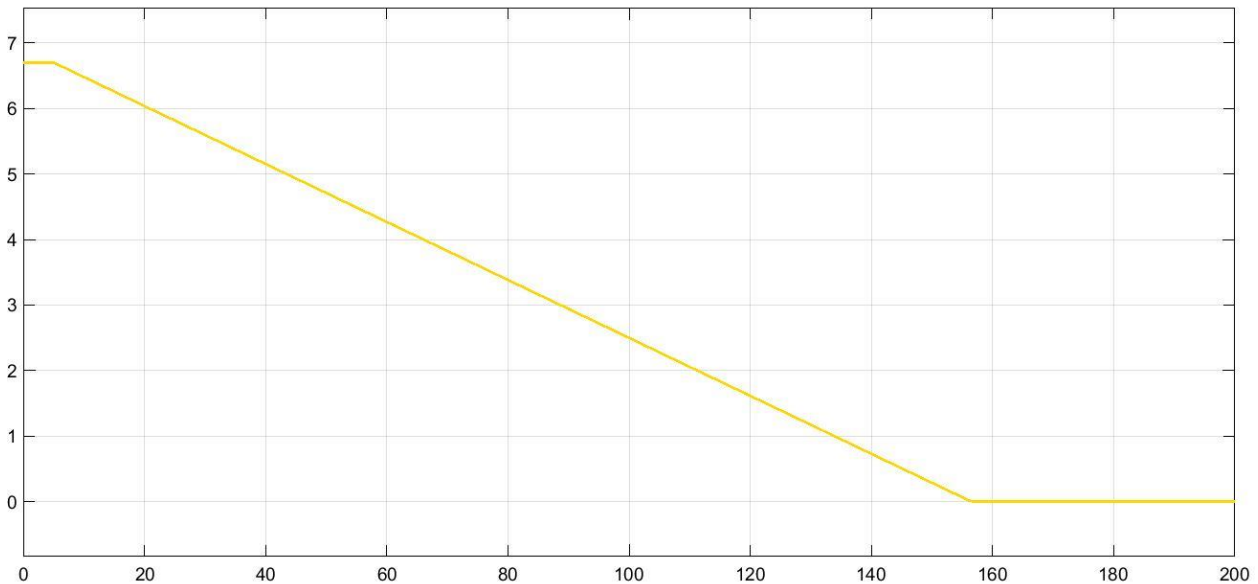
En aquest cas, l'escora inicial ve representada per la lletra A, que es suma al valor final de la funció de transferència de la planta, com a condició inicial.

Ara introduïm els valors del tanc babord 2, en el procés de buidar, i els compararem amb les dades obtingudes amb l'Arduino.



Il·lustració 9 – Funció de transferència de la planta *Buidar Babord 2*

El resultat d'aquesta funció es mostra a la següent gràfica, que s'aproxima a la obtinguda analitzant les dades amb l'Excel.



Gràfic 4 – Representació del buidatge del tanc ER2 amb Simulink

Si comparem les dades de l'Excel, amb les obtingudes amb la simulació, en tres moments podem observar que els valors estan molt pròxims, i com que la planta tampoc és molt precisa, aquests valors són vàlids per l'ús que els hi donarem. A la següent taula es poden observar les diferències entre els valors mesurats i els obtinguts a la simulació en tots els tancs laterals.

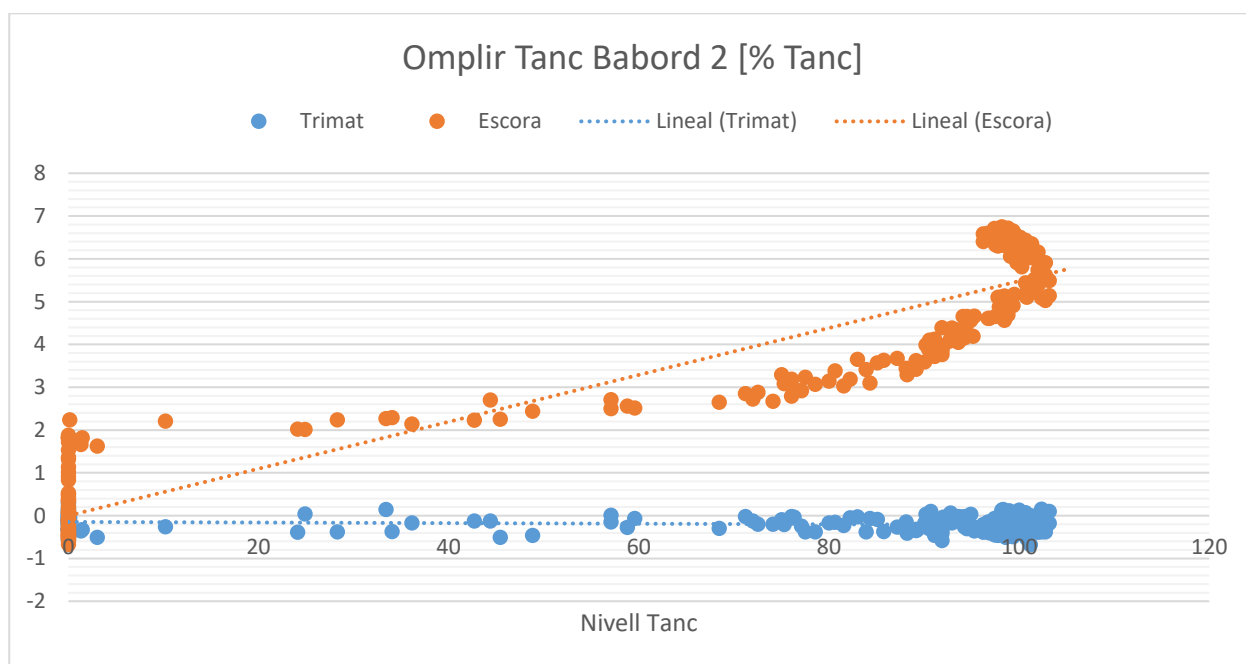
	Temps	Excel	Simulink	% Error
Omplir BR2	40	2.29	2.144	6
	60	3.10	3.216	4
	100	4.96	5.36	8
Buidar BR2	40	5.19	4.8	9
	60	4	3.92	2
	100	1.9	2.07	9
Omplir ER2	40	4.7	4	14
	80	6.7	6.7	0
	100	7.5	7.9	5
Buidar ER2	30	-6.25	-6.399	2
	60	-4.7	-4.49	4
	70	-3.8	-3.86	2
Omplir BR1	20	0.1	0.23	130
	30	0.8	0.84	3
	50	2.2	2.08	5
Buidar BR1	20	2.75	2.67	8
	40	1.65	1.8	15
	60	0.75	0.98	23
Omplir ER1	20	-1.35	-1.54	14
	40	-2.4	-2.796	16
	60	-4	-4.04	1
Buidar ER1	20	-4.4	-4.5	2
	40	-3.36	-3.44	2
	60	-2.2	-2.3	4
Omplir BR3	7	0.1	0.3	200
	15	0.8	0.88	10
	20	1.2	1.24	3
Buidar BR3	7	1.7	1.56	8
	17	0.87	0.9	3
	27	0.4	0.31	22
Omplir ER3	7	-0.5	-0.6	20
	15	-1.5	-1.47	2
	20	-2.2	-2.33	6
Buidar ER3	7	-2.3	-2.25	2
	17	-1.8	-1.6	11
	27	-0.6	-0.67	12

Taula 1 – Comparativa de resultats teòrics i pràctics

Com podem veure en aquesta taula, els valors obtinguts amb les simulacions són propers als extrets amb les proves empíriques. El percentatge d'error no és molt útil en valors molt propers a 0, perquè a la mínima diferència es disparen els valors i deixa de tenir sentit ja que el sensor que mesura l'escora fa variar els valors unes dècimes entre lectures, per error propi del sensor.

3.2. Desestimació dels sensors de nivell als tancs

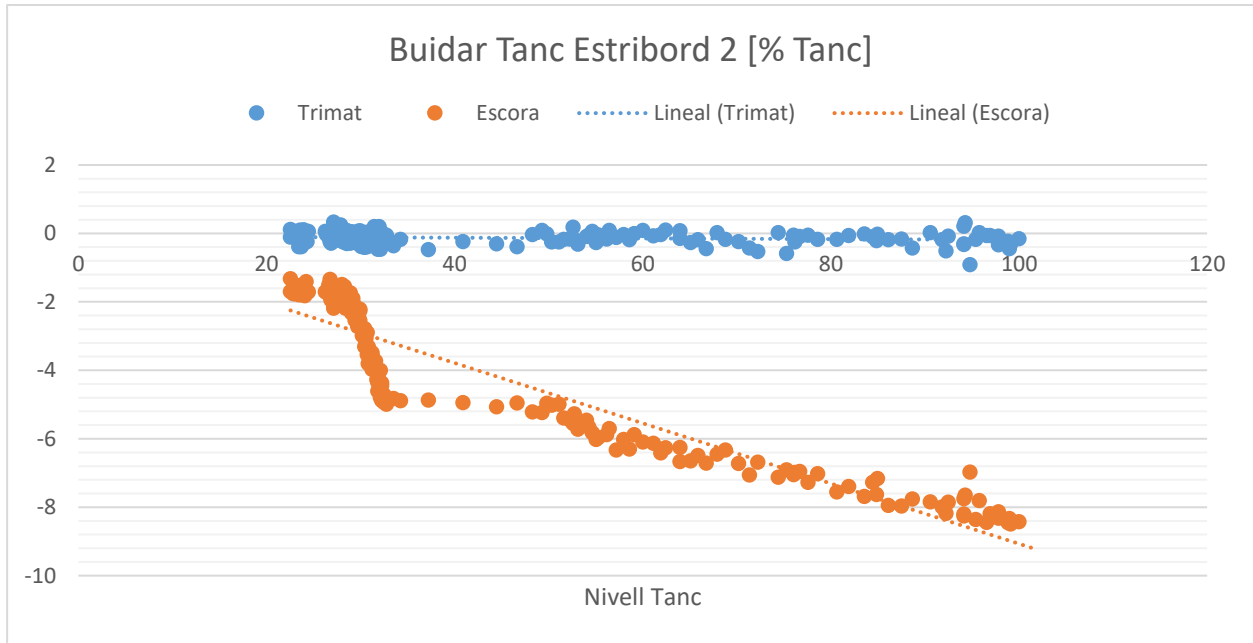
Els motius que ens indiquen que els sensors de nivell no acaben de funcionar del tot correctament són molt amplis. Si agafem els valors llegits del sensor de nivell i els comparem amb els d'escora i trimat veiem que no tenen cap tipus de relació. Sabent que els tancs tenen forma rectangular aproximadament, la relació entre el nivell del tanc i l'escora hauria de ser lineal. El sensor de nivell mesura alçada del líquid al tanc. Si aquest és rectangular, a mateixa diferència d'alçada l'increment d'aigua és el mateix. Per posar un exemple, l'efecte sobre l'escora entre el 20% i el 30% hauria de ser el mateix que entre el 30% i el 40%. Perquè entre els dos casos hem introduït la mateixa quantitat d'aigua. És cert que el centre de gravetat del tanc canvia a mesura que l'omplim d'aigua, però amb la mida tant petita que tenen els tancs, aquesta diferència es fa menyspreable. Per tant assumim que si els valors són correctes, a més percentatge, més influència en l'escora de forma lineal. En les següents gràfiques es mostra com realment aquesta hipòtesi no és vàlida simplement pel mal funcionament dels sensors.



Gràfic 5 – Gràfic de dispersió omplint el tanc de babord #2

Com es pot observar en aquest gràfic, el resultat és molt diferent al d'una recta, que seria el resultat que ens mostraria una relació lineal. Aquest cas és el d'omplir, però quan toca buidar-lo el resultat és el mateix.

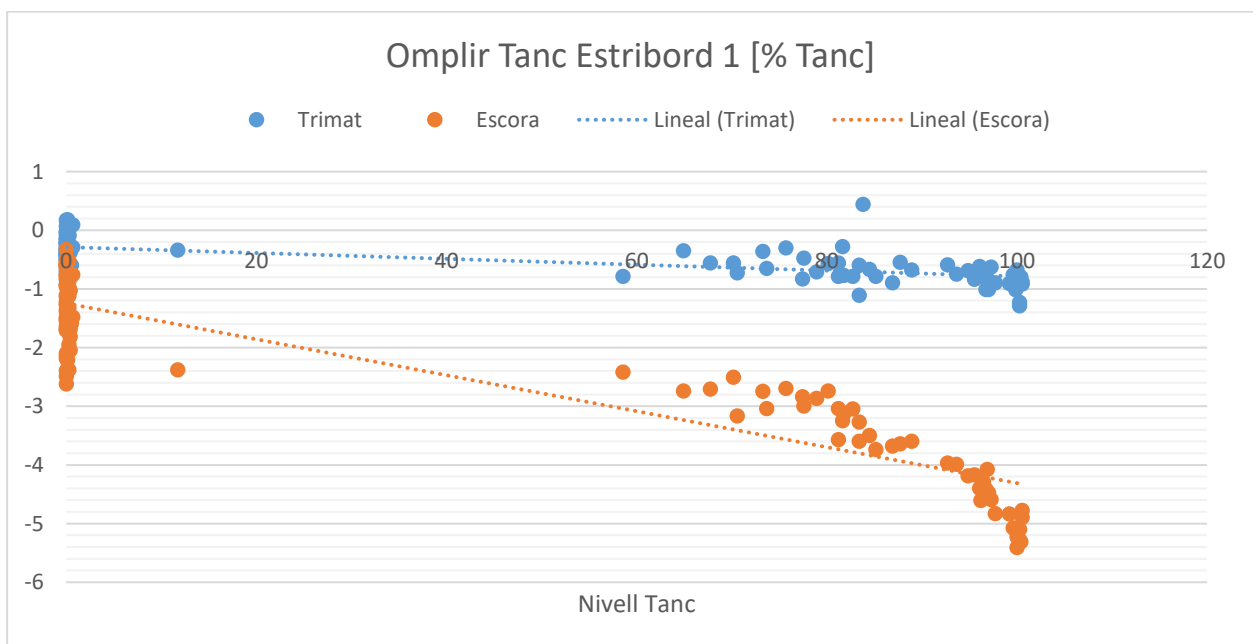
Als següents gràfics veiem com el tanc d'estribord 2, sí que s'aproxima una mica a una línia recta, però tenim el problema que del 0% al 20% el sensor de nivell no dona cap senyal. Per tant tenim una incertesa molt gran que no toleraria el nostre controlador. Entre el 30% i el 40% tampoc dona uns resultats precisos ni adients per un control automàtic. Per tant, sent dels millors resultats obtinguts en tots els tancs, en diferents situacions i dies, aquests sensors tenen una limitació física que queda molt per baix de les exigències mínimes que necessitaríem. Si volem establir un control que sigui precís i poder optimitzar-lo en consum i temps, no podem permetre que els sensors tinguin zones mortes de lectura o que les seves lectures a determinats espais no siguin raonables. Com coneixem les formes dels tancs, aquestes ens determinen el seu comportament teòric a l'hora d'omplir o buidar-lo i aquesta aproximació teòrica no és la mateixa que el model obtingut recollint dades.



Gràfic 6 – Gràfic de dispersió buidant el tanc d'estribord #2

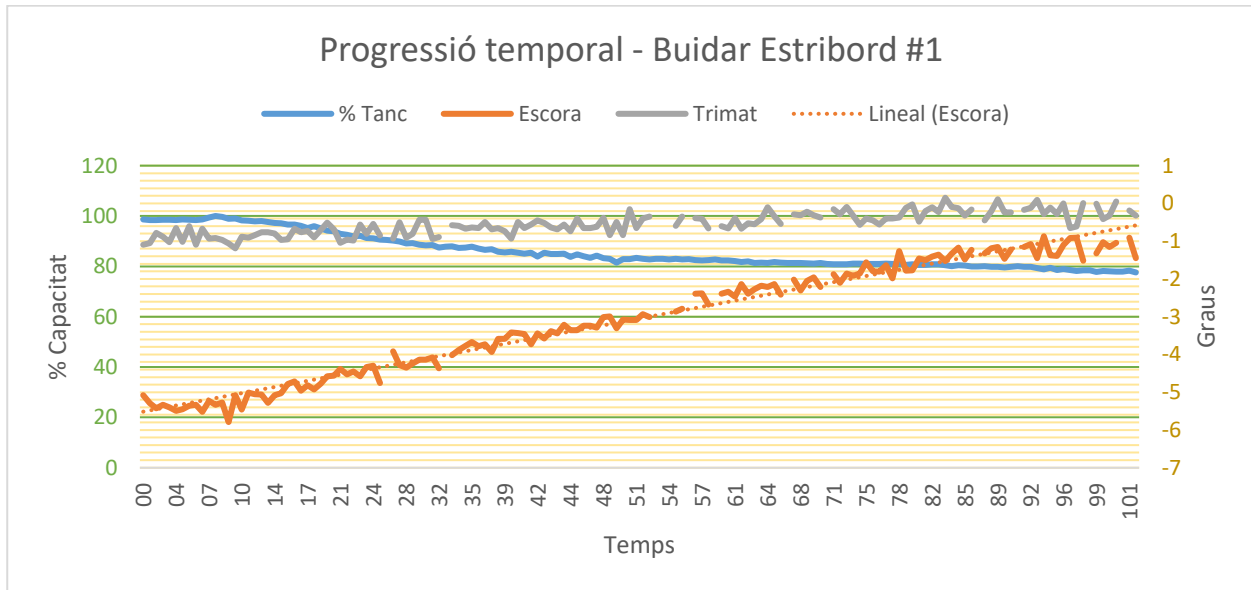
A l'altra banda, el tanc d'estribord 1, el sensor que té instal·lat és el que pitjor resultats dona, quan s'omple en menys de 10 segons omple un 70% del tanc i en 40 segons no dona senyals apart de 0. A l'hora de buidar, el sensor no baixa d'un 80% fins passades unes hores on no es pot introduir més aigua o torna a bloquejar-se al 80%.

Per tant assumint que la resta de sensors poden tenir unes lectures semblants a les reals, i que en canvi el sensor del tanc d'estribord #1 dona contínuament lectures errònies, prenem la decisió de que no es convenient fer servir les dades que ens proporcionen aquests sensors per al control que volem implementar.



Gràfic 7 – Gràfic de dispersió omplint el tanc d'estribord #1

L'última observació que es pot extreure de les dades obtingudes pels sensors i les proves experimentals és que cada tanc, depenent de la seva ubicació i mida, té un efecte molt diferent sobre el trimat i l'escora.



Gràfic 8 – Relació temporal del buidatge del tanc d'estribord #1

Veient tots aquests problemes, on els sensors dels tancs no donen resultats viables, no es farà servir cap dels sensors, sinó que es calcularan de manera teòrica els valors de nivell de la planta, que no seran correctes del tot però són la única opció que tenim per saber el nivell dels tancs, ja que els sensors no realitzen la seva funció correctament.

Capítol 4. Disseny del controlador

Aquest capítol aborda el disseny del controlador basat en el model obtingut en el capítol anterior. L'estratègia de control ens ha de permetre controlar les variables sobre les que podem actuar de la forma més eficient i ràpida possible.

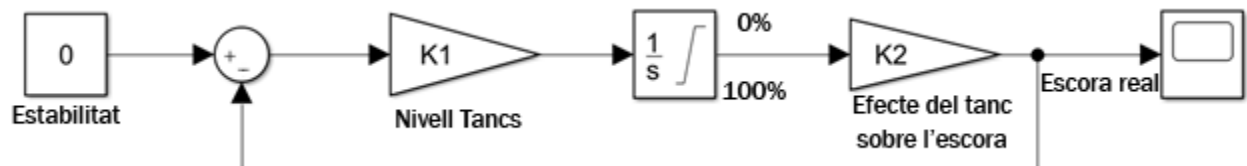
4.1. Configuració de control

L'estratègia de control que es seguirà en aquest projecte és la següent:

S'implementarà un control en llaç tancat sobre la planta, que estarà formada per totes les funcions de transferència relacionades amb cada tanc, i es mirarà de controlar l'escora i el trimat. Tot això seguint un arbre de preferències per adequar aquest control automàtic a casos de la vida real, com la necessitat de no deixar espais lliures quan s'omple un tanc per evitar els moviments de l'aigua durant la navegació.

Com que cada tanc està format per una funció de transferència, i tenim dues variables a controlar anirem realitzant el control per a cada tanc de forma individual segons les circumstàncies, i després els unirem per aconseguir un control multivariable que permeti governar tots els tancs per tal d'aconseguir l'estabilitat.

Per aconseguir aquest objectiu, amb el MATLAB i Simulink es dissenyarà tota l'estratègia de control, fins a obtenir els controladors que estabilitzin la planta, i tenint els resultats aquests seran portats al PLC que s'encarregarà del control real, i una vegada dins del PLC s'implementarà l'arbre de preferències, perquè actuï segons el que sigui més adient.



Il·lustració 10 – Control en llaç tancat per un tanc tipus

Aquest es el tipus de control en llaç tancat que realitzarem per cadascun dels tancs. El valor d'estabilitat que voldrem serà 0° i com que no podem actuar sobre cap variable de la maqueta, ja sigui la velocitat de la bomba, el seu voltatge o obrir més o menys la vàlvula. Només podem utilitzar un controlador *on/off* que actuï sobre el conjunt vàlvula/bomba, i quan els valors dels blocs relacionats amb cada tanc s'activen, això implica que el conjunt vàlvula/bomba s'activa.

Sense poder controlar la reacció de la planta, no podrem millorar-ne el comportament, ni fer el control més ràpid ni fer-lo més fiable. Això amb uns altres medis a la maqueta si que hauria sigut possible.

4.2. Control en llaç tancat simple

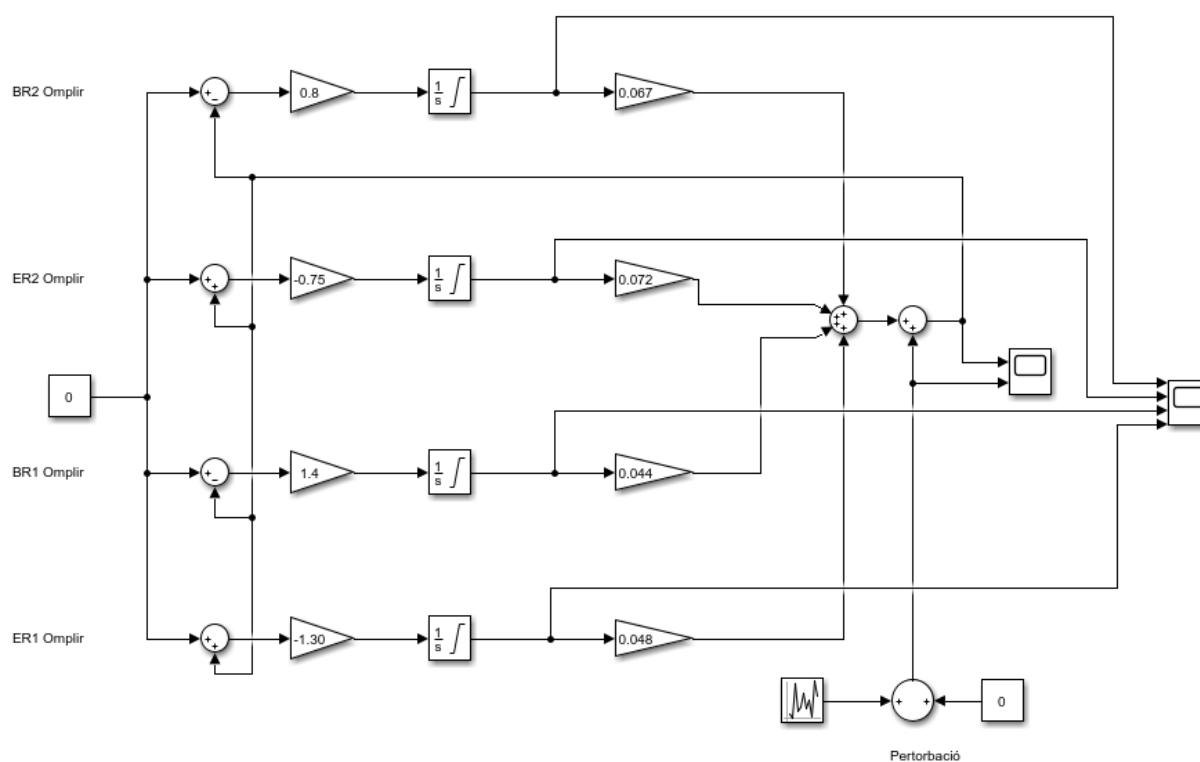
Per trobar el control òptim a tots els tancs, hem de començar aproximant el controlador i simplificar-lo per després anar acotant el seu comportament i que segueixi les directrius que interessen per aconseguir un bon control. El primer pas es escollir uns tancs representatius i provar directament el seu funcionament en llaç tancat sense cap tipus d'estratègia. Per aquest cas s'ha escollit els tancs numero 1 i 2, els número dos per ser els més grans (i per influir més sobre l'escora) i els número 1 per tenir un efecte significatiu però quedant-se enrere amb els número 2. El motiu pel qual no s'ha escollit els número 3 és perquè el

seu efecte és molt menor, i per realitzar les proves una variació de 2° a 3° és molt petita per a l'observació dels resultats.

El procediment per muntar el sistema de control és agafar les quatre funcions dels tancs, els de babord s'encarreguen de controlar els valors positius de l'escora, i els d'estribord els negatius. En canvi per buidar, els mateixos tancs poden afectar buidant-se i així aconseguim que tots els tancs afectin a tots els valors d'escora.

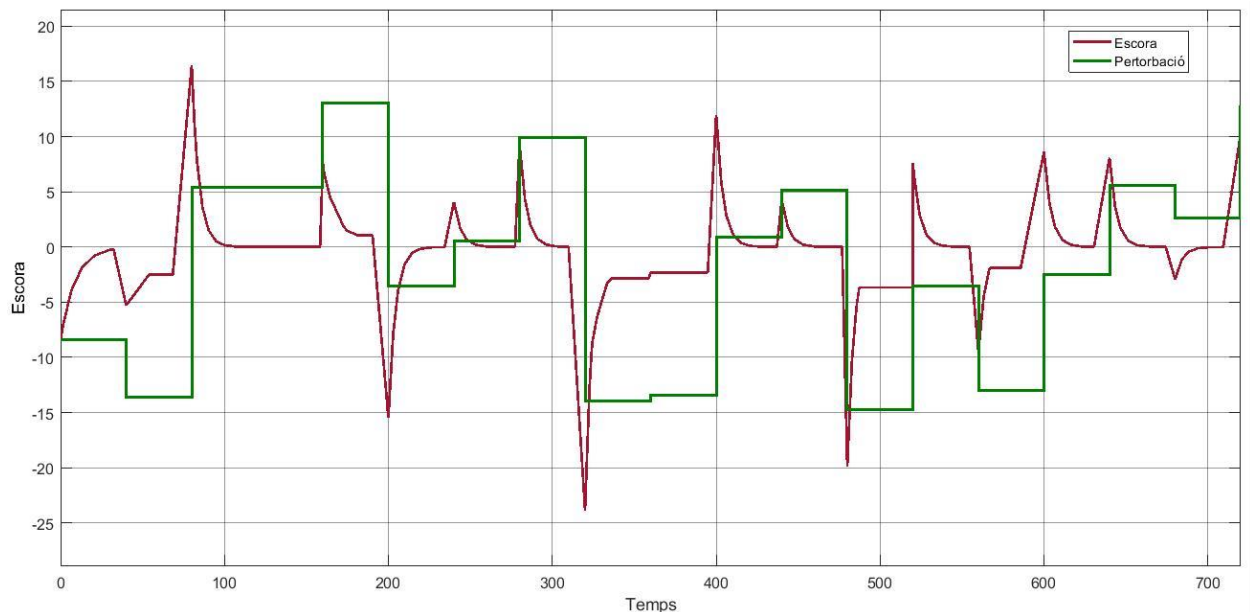
La primera aproximació es realitza només amb les funcions de omplir els tancs, fent-les servir també per buidar-los. Això es fa així perquè per analitzar el comportament és molt més senzill treballar amb quatre funcions i no vuit, i la diferència de les funcions entre omplir i buidar és menor comparada amb l'efecte que realitzen.

Per veure el comportament, s'ha de delimitar quin és el valor d'estabilitat que volem, en aquest cas 0°. I s'ha d'afegir una pertorbació aleatòria que vagi modificant el valor de lectura de l'escora, que seria el mateix que la col·locació de la càrrega sobre el portacontenidors. I finalment s'han afegit dos observadors, un que compara el valor de la pertorbació i l'escora final, i un altre que observa el nivell en percentatge dels quatre tancs, per anar veient la seva evolució



Il·lustració 11 – Primera aproximació de la planta

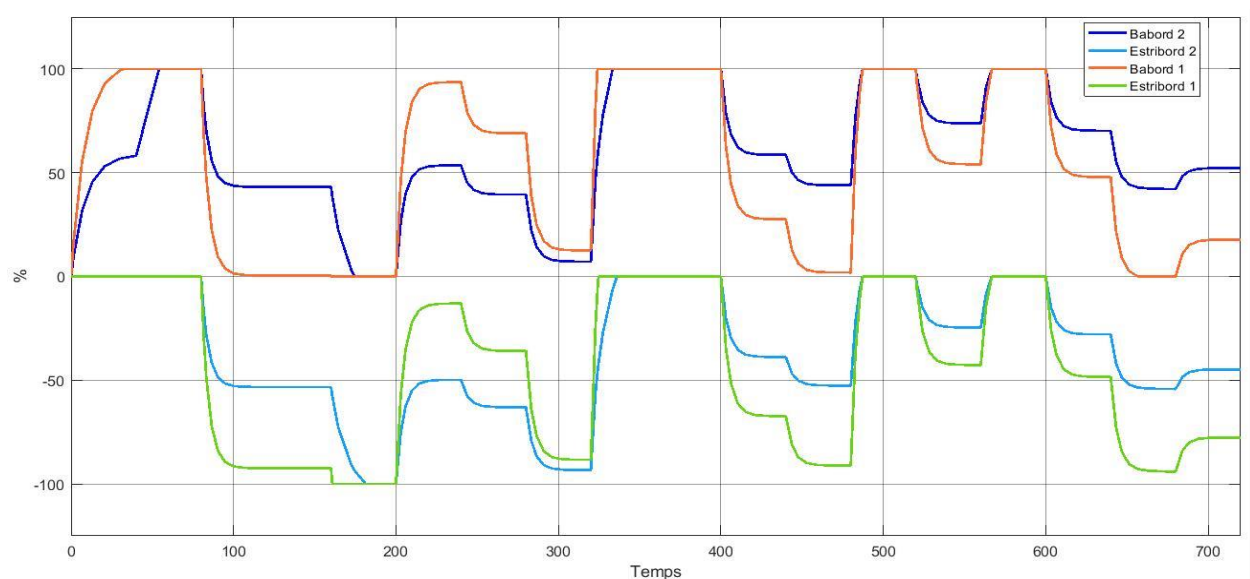
Per comprovar el funcionament, s'estableixen els valors de la pertorbació entre els límits de ± 15 , uns valors molt elevats, difícilment provats amb la maqueta física, però per veure el comportament en situacions complicades aquesta és la millor forma.



Gràfic 9 – Comportament de la primera planta (Escora/Pertorbació)

Com es pot observar en aquest gràfic, quan la pertorbació és molt elevada, en els casos en que s'aproxima als màxims, la planta no és capaç de corregir l'escora i fer-la arribar a 0, això és degut a que la capacitat dels 4 tancs no és suficient per contrarestar una escora tant elevada. En el supòsit de tenir els 6 tancs sí que seria possible arribar al valor de 0. En la resta de situacions sí que el control en llaç tancat és capaç de mantenir l'estabilitat de la planta.

Al següent gràfic es pot observar com els tancs van omplint-se i buidant-se segons les demandes per poder arribar a aconseguir una escora nul·la. Es poden observar diferents casos on els tancs d'una banda estan al 0%, i els de l'altre banda al 100%, això és degut a que amb la combinació dels quatre tancs no és possible arribar a assolir els 0° d'escora. En la resta de situacions els valors són entremetijos, i amb una correlació entre els quatre, que es comporten igual, els de babord amb la mateixa línia, però a diferents percentatges d'ompliment i en canvi els d'estribord amb la mateixa tendència però en sentit contrari.



Gràfic 10 – Comportament de la primera planta (4 Tancs)

Veient aquesta gràfica observem el primer error d'aproximació. Cada funció té incorporada la bomba i la vàlvula, i com només tenim una bomba en la maqueta, és impossible que els 4 tancs funcionin a la mateixa vegada per controlar l'escora.

Això ens planteja que hem d'afinar el nostre control per evitar que més d'una funció s'activi simultàniament.

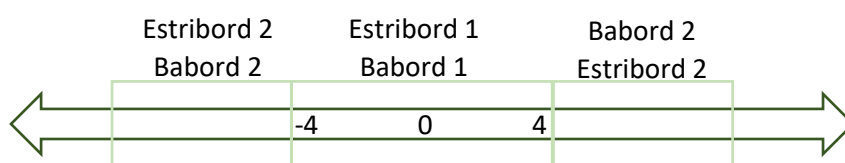
4.3. Introducció del control en llaç tancat amb condicionants

Veient que una estratègia de control tradicional no compleix amb els requisits fonamentals de que pugui ser extrapolable a la maqueta real, hem de pensar en altres formes de aconseguir un control que funcioni i pugui ser posat a prova amb la maqueta.

Per això introduïrem els conceptes de la lògica booleana en el control que volem crear. No l'aplicarem en el sentit estricte del control booleà, sinó que aplicarem el concepte de separar per fragments la resposta de la planta. Explicarem el mètode a mesura que l'apliquem al nostre problema de control.

El primer pas és determinar unes cotes sobre les variables que volem controlar, en aquest cas es l'escora. Així que establim la cota de 4° a banda i banda. Aquest valor s'ha escollit perquè es un valor que poden solucionar els tancs petits, apropant-se al límit de 5° aproximadament.

Ara que hem delimitat la cota de 4° positius i negatius, hem dividir tot l'espectre de la variable que volem controlar. Des de escores més grans fins a 4° , des dels 4° fins als -4° , i dels -4° al les escores més petites que -4° .

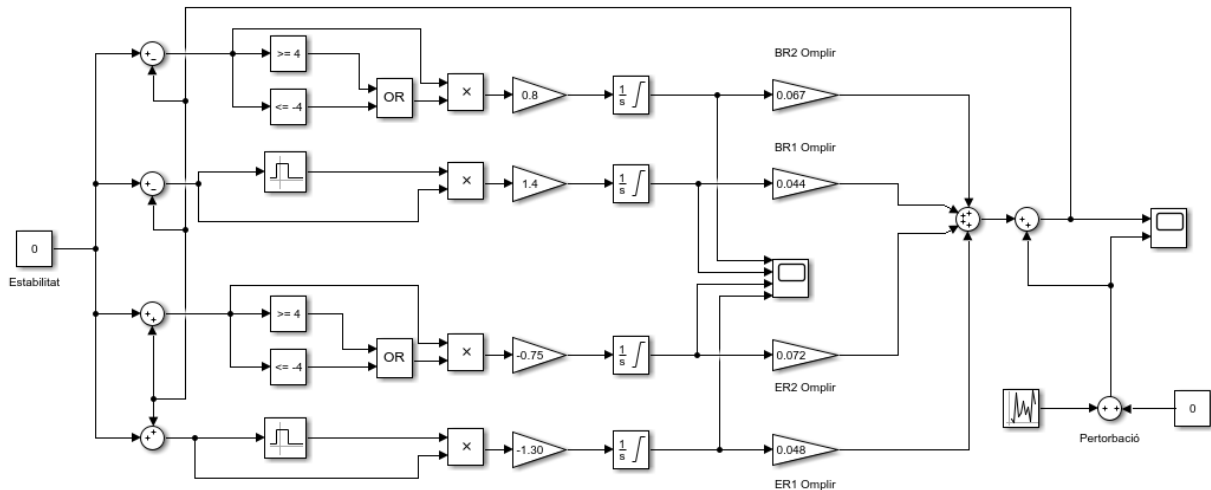


Il·lustració 12 – Cotes del control condicionat

Una vegada acotats els marges, hem limitat que els tancs 1 i els 2 actuïn al mateix temps, però seguim tenint el problema que per controlar l'escora, els tancs han de poder omplir i buidar-se. Per això a cada secció apareixen els dos tancs, el tanc que controla l'escora omplint-se i el que controla l'escora buidant-se. Aquesta dinàmica sí que és possible en la realitat, simplement la solució es transvasar aigua, i mentrestant un tanc s'omple, la mateixa aigua passa al tanc de l'altre banda maximitzant l'efecte sobre l'escora.

Això ens planteja nous reptes, ja que el transvasament no sempre és possible, en el moment en que un tanc es quedi sense aigua en una banda, ha de ser possible omplir-lo directament des de la presa de mar. Això significa que es necessiten en total, 4 funcions per omplir del mar els tancs i 4 funcions per buidar els tancs al mar.

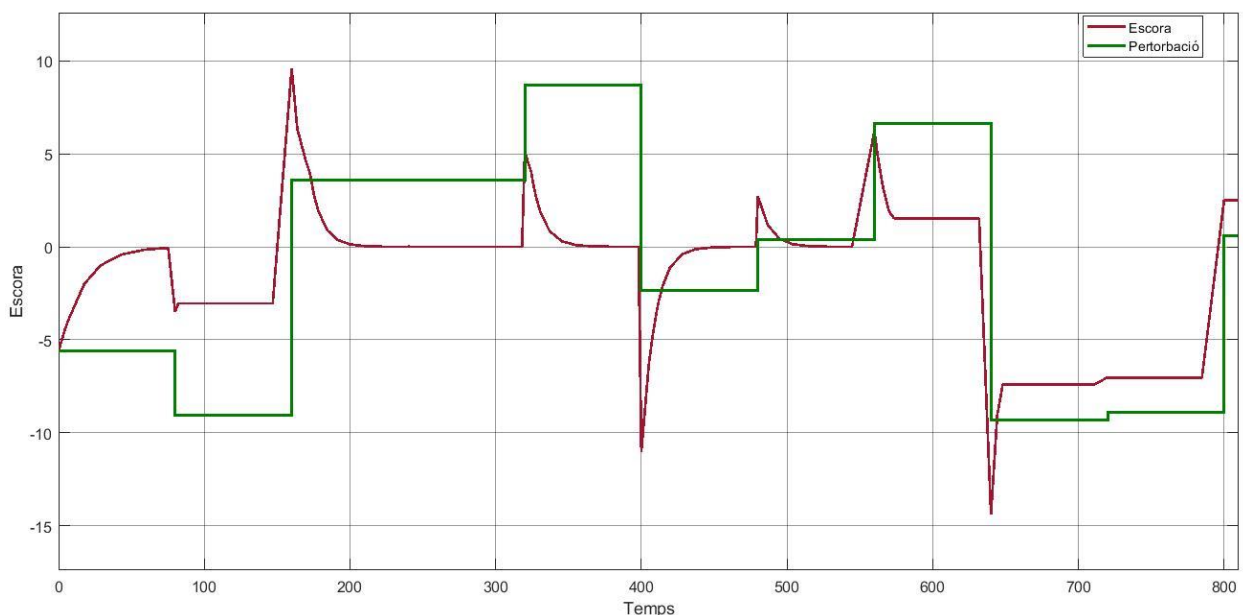
Abans de provar a augmentar el número de funcions que seran necessàries, és primordial observar el funcionament del control condicionat sobre la planta que ja teníem preparada anteriorment. Per aplicar aquestes restriccions s'ha optat per utilitzar la lògica booleana, amb base a comparadors per seleccionar els valors d'escora i anul·lar o activar les respostes a cada grup de tancs. Per als tancs 1, s'ha optat per un bloc d'interval, per comprovar si està comprés entre 4 i -4.



Il·lustració 13 – Aplicació de la lògica condicionada amb blocs de lògica booleana

Com es pot observar, s'han fet servir blocs comparadors (i d'interval), un bloc de suma booleana (OR) i un bloc de multiplicació matemàtica. Així, si el senyal de l'escora compleix el requisit de la lògica condicionada (estar dins de l'interval marcat) el comparador dona una sortida lògica de 1, que multiplicada pel valor real de l'escora, dona el valor real de l'escora perquè el tanc pugui omplir-se o buidar-se. En cas contrari, si el valor de l'escora està fora de l'interval marcat, el comparador donarà una sortida de 0, que multiplicada pel valor real de l'escora anul·larà el valor d'escora que arriba a la funció del tanc. Com que els tancs volen una escora de 0, si forcem aquest valor amb aquests blocs, aquests tancs deixen de omplir o buidar aigua.

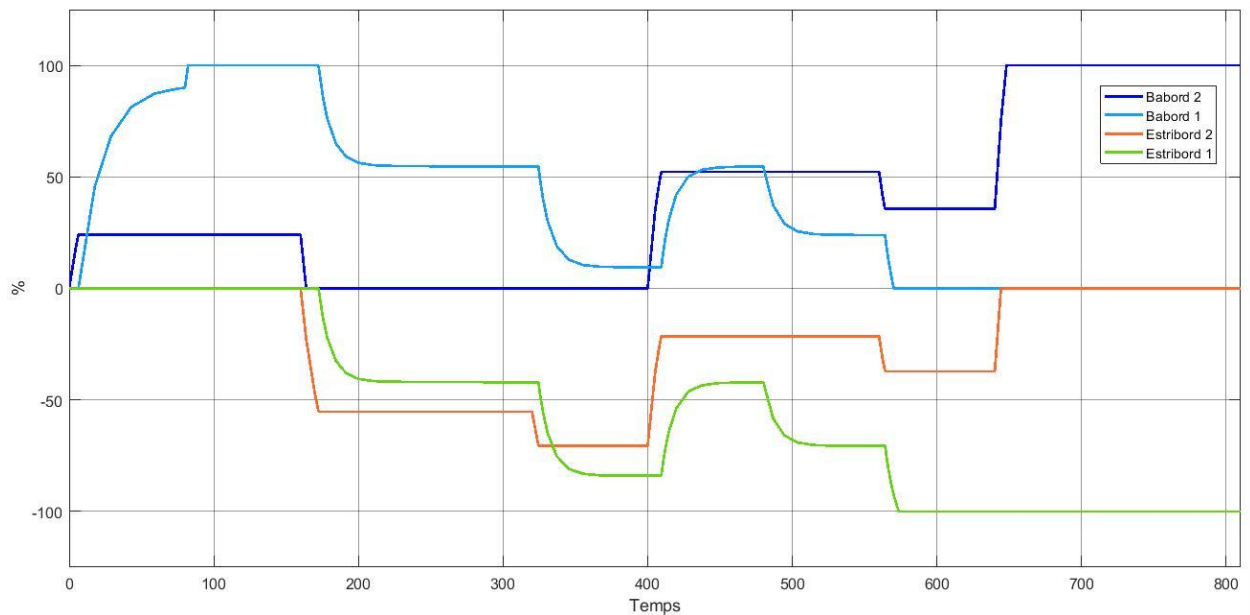
Això ens planteja un problema inesperat, després de realitzar proves amb el Simulink, s'han donat els casos on la pertorbació inicialment era menor que 4, per tant només s'activen un grup de tancs, però després la pertorbació es fa major, però l'escora resultant continua sent menor que 4 tot i que els tancs ja estan al límit, un ple i un buit. Per tant en aquests casos concrets s'observa que l'escora final, mai arriba a 0 sinó que es queda estable en el valor màxim que tenen aquests tancs de correcció.



Gràfic 11 – Comportament amb la introducció de la lògica condicionada (Escora/Pertorbació)

Es pot observar que voltant als 100s, la primera pertorbació era de -5° , i després augmenta a aproximadament -8° , però com els tancs ja havien actuat, l'escora resultant es de -3° , i com es pot observar en el següent gràfic, el tanc de babord 1 està al 100% i el d'estribord 1 al 0%. Per tant aquesta situació, tot i ser rectificable amb els tancs 2 ha forçat els requeriments per fer que no s'estabilitzi.

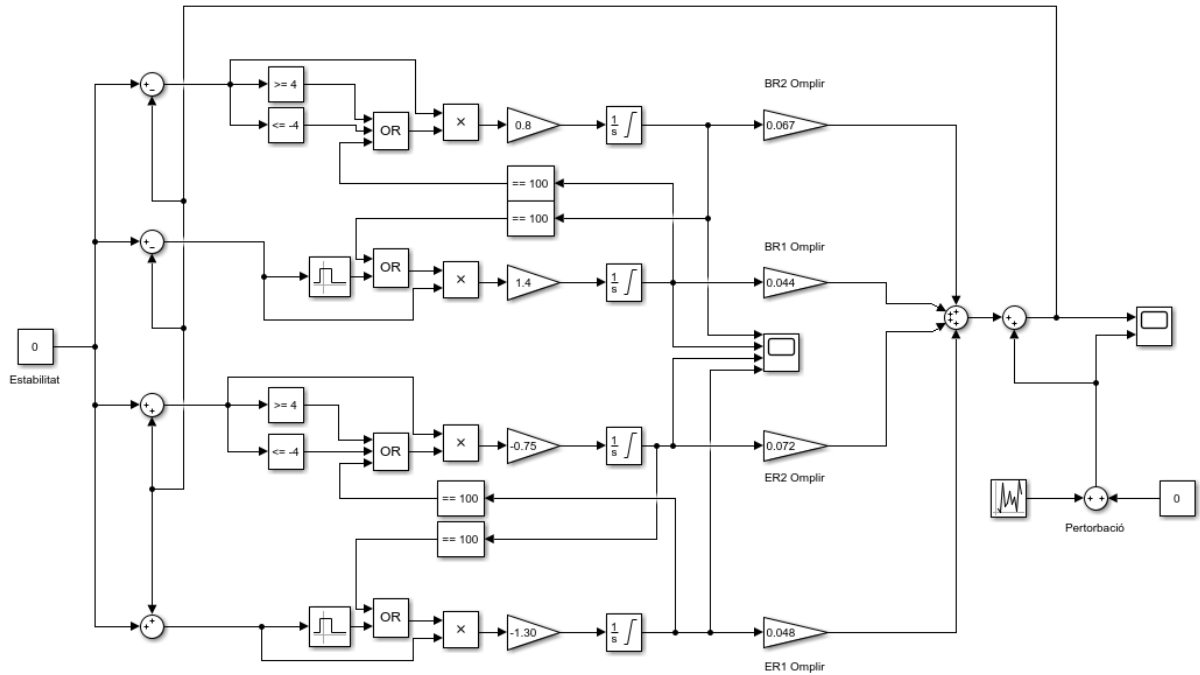
Com es podrà veure, el tanc 2 està al 25% amb molta capacitat per omplir-se d'aigua i corregir aquesta desviació en l'escora, però els límits que hem posat per establir un control condicionat limiten que pugui actuar. El problema és que els tancs tenen una capacitat limitada, en algun altre tipus de planta, on la capacitat reguladora anés diferent possiblement hagués funcionat. Però en una situació de control multivariable s'han d'acotar moltes possibilitats.



Gràfic 12 – Comportament amb la introducció de la lògica booleana (4 Tancs)

4.4. Forçar l'entrada dels tancs en els extrems

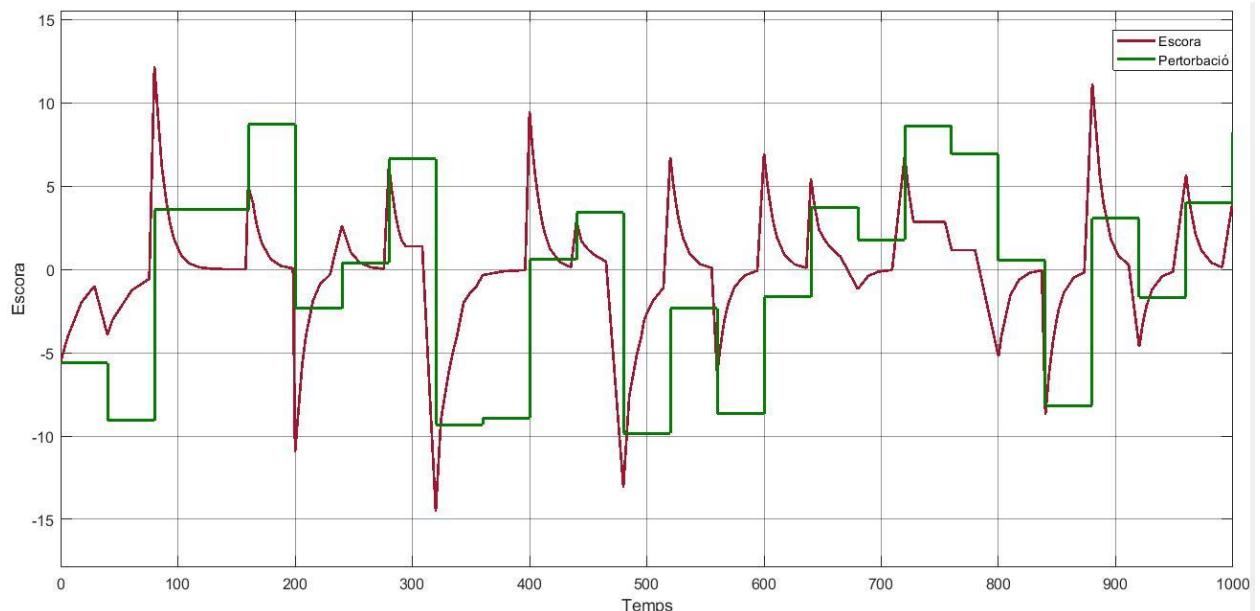
Per solucionar aquest problema, s'afegeix una altra regla que condicioni l'actuació dels tancs, com podem veure, el problema el tenim en el fet que quan un dels tancs està al 100% i no ha aconseguit estabilitzar-se el sistema es queda bloquejat sense arribar a l'equilibri. Per això s'ha afegit un altre bloc lògic que s'activa quan un dels tancs està a la capacitat màxima, és a dir els nous condicionants per cada tanc són: que estigui dins de l'interval d'actuació (mesurant l'escora) i que l'altre tanc del mateix costat estigui a la màxima capacitat i no hagi pogut corregir la pertorbació.



Il·lustració 14 – Planta amb els blocs d'activació per tancs al 100%

Com es pot observar això s'ha aconseguit introduint més entrades als blocs de suma lògica i introduint un comparador a la sortida del percentatge de cada tanc, on si l'homònim està ple activa la sortida lògica al tanc del costat per a que pugui actuar.

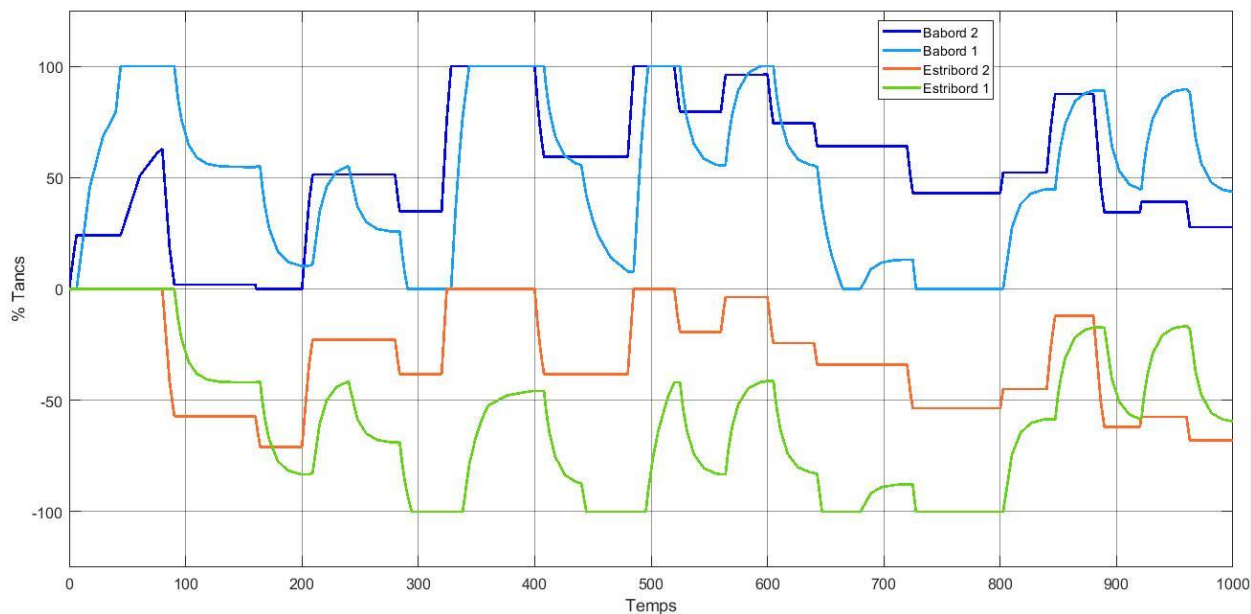
Això soluciona els problemes d'inacció dels tancs quan per motius d'escora s'ha situat el control condicionat fora dels marges d'actuació de cada tanc i aquests resulten ineficaços.



Gràfic 13 – Comportament de l'escora quan s'activen els tancs fora del rang (Escora/Pertorbació)

Una vegada solucionat aquest problema si ens fixem en el gràfic 13, observem que al instant 750s, l'escora no es recupera tot i estar en valors molt propers a zero, i pròxims als 3°. Una correcció de 3° quan la

pertorbació és del voltant de 7° no hauria de resultar cap problema, però com podem constatar algun element està limitant l'actuació del control i això evita que es pugui corregir aquesta desviació de l'escora.

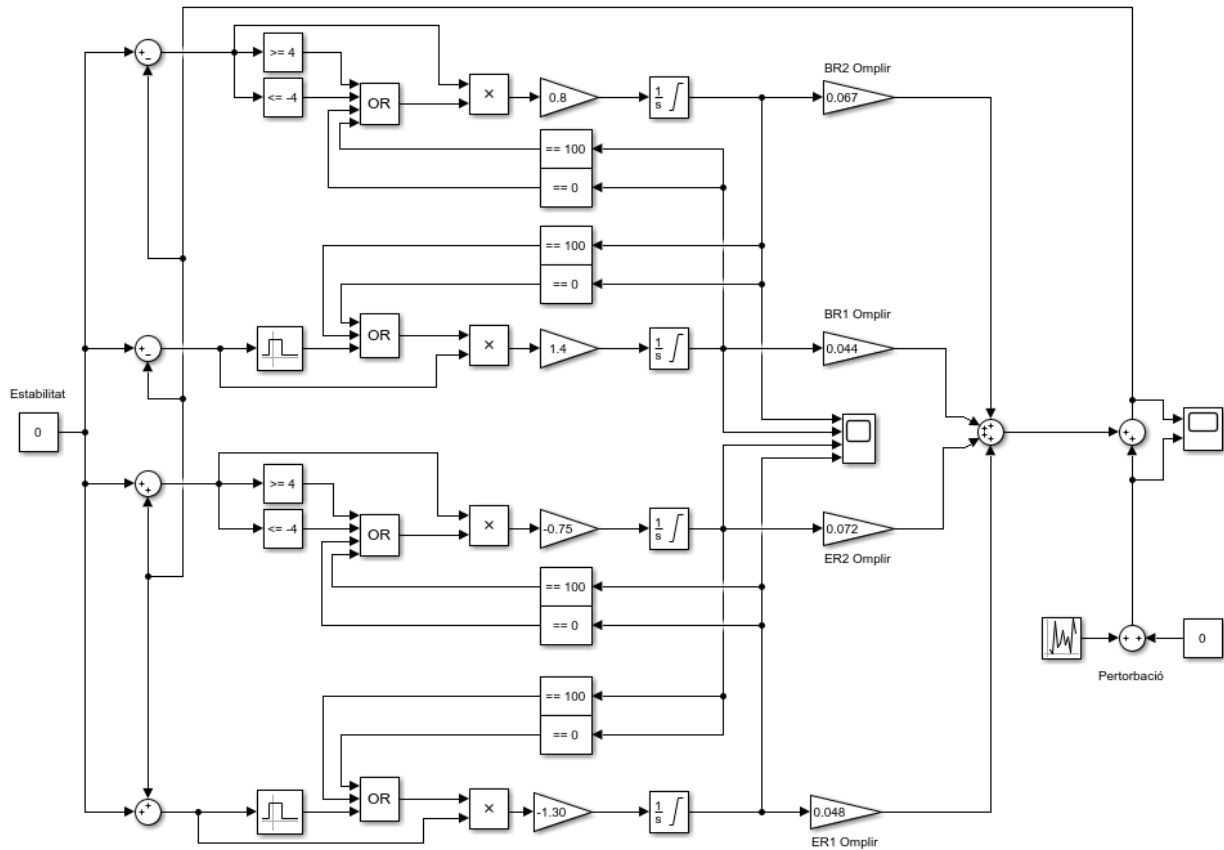


Gràfic 14 – Comportament dels tancs quan s'activen fora del rang d'escora (4 Tancs)

Observant la gràfica del percentatge dels tancs en aquesta situació veiem que al moment problemàtic es situa sobre els 750s. En aquesta situació veiem com el tanc de babord 2 i el d'estribord 2 tenen una capacitat estimada del 50%, això els permet corregir la desviació de 3° que impedeix arribar a l'estabilitat plena. Per tant és necessari acotar també els límits inferiors dels tancs, ja que si era un problema que arribessin al 100% i tot i així no haguessin pogut solucionar el problema de la pertorbació, en el cas contrari, si un tanc està al 0% i no ha pogut solucionar-ho, s'haurien d'activar els altres tancs per evitar aquestes situacions.

Fetes aquestes correccions, els tancs estan controlats per dos tipus de lògiques diferents: el control condicionat i la lògica booleana. El control condicionat ens diferencia els tancs segons la seva capacitat d'actuació, i la lògica booleana ens determina les situacions límit, i ens permet solucionar els casos on els paràmetres del control condicionat no aconseguixen estabilitzar l'escora.

Durant tot aquest desenvolupament del model, a partir dels nombrosos experiments, s'ha pogut constatar i avaluar el comportament de la maqueta davant de moltes pertorbacions i de situacions diverses. Això ha permès definir les limitacions del model físic i poder-les comparar amb els models simulats creats al *Simulink*.



Il·lustració 15 – Planta amb els condicionants lògics de tancs al 0% i 100%

4.5. Descartar l'estratègia

Aquest model realment actua en principi segons els criteris necessaris per a que funcioni la planta i pugui estabilitzar-se. Però el problema subjacent no és el funcionament real, que sí que seria possible en algunes situacions, sinó que té un error de concepte que no concorda amb la construcció de la maqueta.

Les funcions que controlen cada tanc que s'han anat desenvolupant estan creades a partir de les dades d'omplir, tot i que fan la funció d'omplir i buidar. Això és una aproximació força realista perquè les dues funcions són molt semblants en valor, amb la precisió i el temps de resposta que té la maqueta són diferències acceptables.

Per argumentar el canvi observem la situació als 300 segons, veiem que el tanc d'estribord dos es buida i el de babord 2 s'omple, fins aquí no hi hauria cap problema perquè l'aigua es transvasa, però l'aigua inicial en el tanc d'estribord és inferior a l'aigua que s'introdueix en el tanc de babord, i segons el model actual això no està contemplat.

Però el problema real és quan dos tancs s'activen al mateix temps, per transvasar aigua. Quan omplim un tanc, estem afegint massa a un lateral de la maqueta, i això provoca que l'angle d'estabilitat variï. Si en canvi, transvasem aigua, estem movent la mateixa quantitat d'aigua des d'una banda a l'altra, i això el que provoca és que l'efecte del moviment de la massa sigui molt més ràpid que si buidem el tanc al mar, i omplim el contrari des del mar també.

Aquests dos fets forcen el replantejament del model, per adaptar-lo de base a aquests requisits però mantenint la separació de tancs per graus d'escora i el fet que s'activin quan l'homònim estigui al 100% o 0%.

4.6. Canvi d'estratègia

La nova estratègia de control segueix els mateixos principis que el model anterior, però canviant la base de les funcions que governen els tancs. Si fins aquest moment la funció era lineal amb els dos guanys (tanc i escora) ara introduïrem guanys diferents per les situacions de omplir/buidar i per transvasar. D'aquesta manera s'aproximarà més fidelment a la realitat i podrem introduir el control per governar la maqueta amb seguretat.

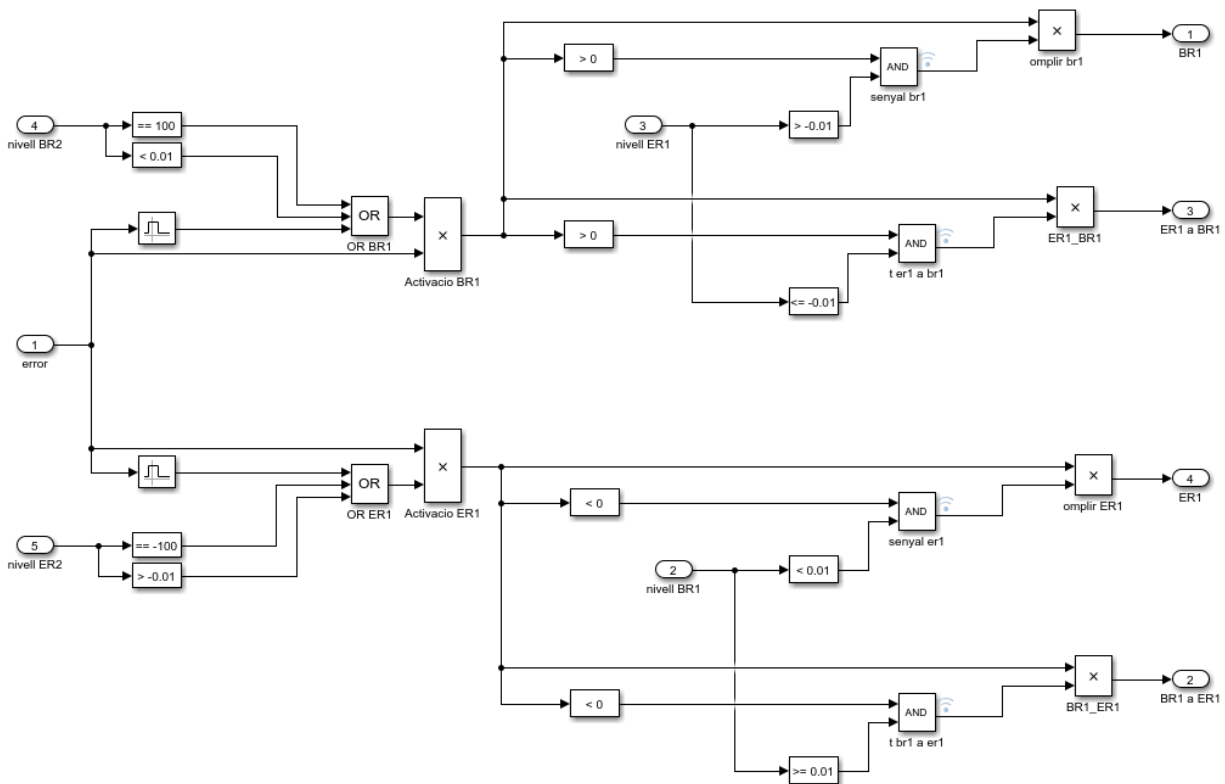
Per ordenar el model i que sigui més clar el seguiment dels senyals, s'han separat les dos parts principals: el control i les funcions que actuen sobre l'escora. En un subsistema tenim el control amb els condicionants que activen cada tanc i fora del subsistema els blocs que actuen sobre l'escora, per poder veure el seu efecte sense haver de tenir a la vista tots els blocs que s'encarreguen d'activar o desactivar segons convingui les diferents funcions.

4.6.1. Subsistema de control

Dins del subsistema de control, les variables que afecten al seu funcionament són:

- Els nivells dels tancs (els de babord i d'estribord)
- L'error en l'escora en tot moment

I les sortides del subsistema corresponen a l'activitat de cada tanc, una sortida per omplir-lo i buidar-lo, i dues per transvasar l'aigua. Això per tots els tancs amb el mateix número, és a dir la mateixa ubicació en la direcció proa-popa.



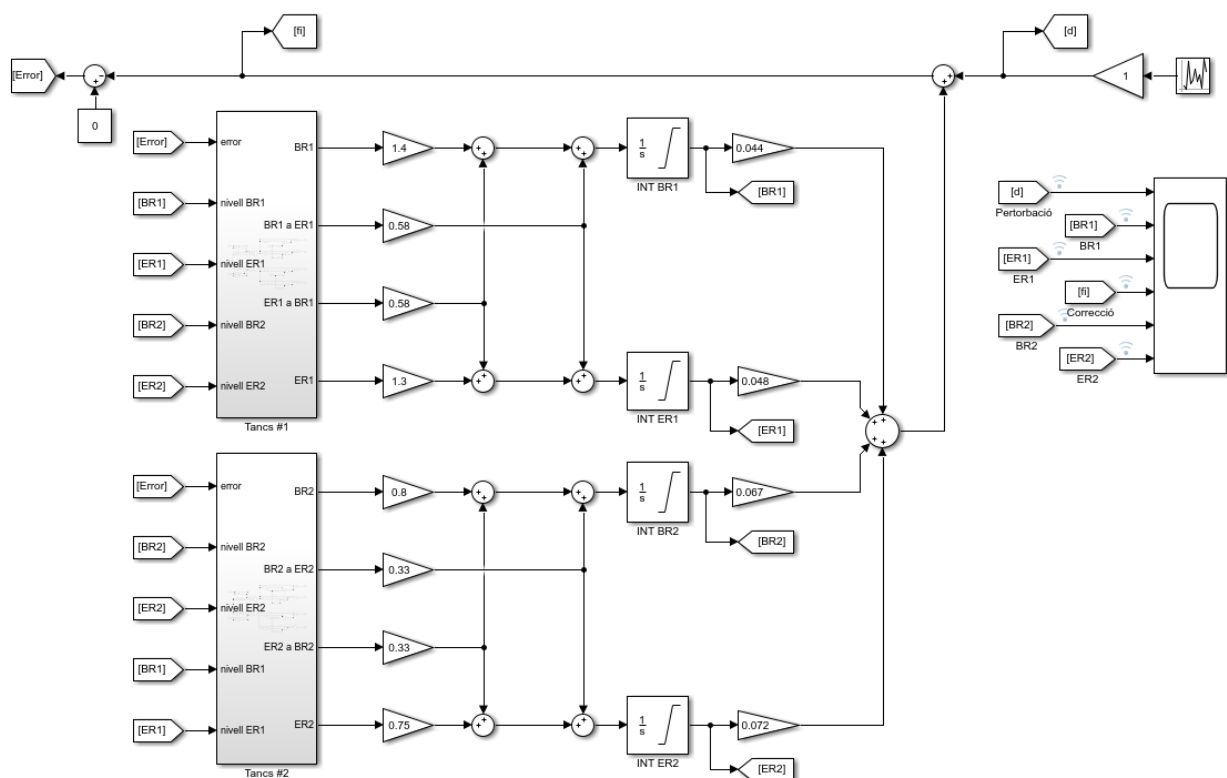
Il·lustració 16 – Subsistema de control pels tancs #1

Com es pot observar el subsistema primer rep la informació de l'error en les lectures de l'escora, i les compara per saber si està dins de l'interval d'actuació dels tancs número 1. També tenim la possibilitat de que si els tancs centrals de la mateixa banda estan plens o buits i no poden contrarestar l'efecte de l'escora, poden forçar l'activació dels altres tancs tot i no estar dins de l'interval on aquests tancs responen a l'error d'escora.

Després depenent de si l'escora és positiva o negativa, s'activen els tancs de babord o estribord. Per millorar l'eficiència del sistema, sempre que sigui possible s'ha de transvasar l'aigua i com a ultima opció omplir o buidar els tancs des del mar o cap al mar respectivament. Això està implementat amb uns comparadors lògics que detecten el nivell del tanc, i si aquest té un nivell d'aigua superior al 0.01% es transvasa fins omplir-lo o buidar-lo (s'ha agafat aquest valor com a 0 per evitar errors de lectura, perquè el 0 exacte és poc probable d'assolir amb una planta real).

4.6.2. Control dels tancs i l'escora

Una vegada el subsistema de control ha establert quins tancs actuen i quins no, el controlador s'assembla molt als anteriors que s'han anat desenvolupant. Una vegada es decideix quina acció es duu a terme (si omplir/buidar o transvasar) s'activa un bloc de guany corresponent a cada un dels tancs i depenent de l'acció el valor és diferent. Aquest valor de guany varia perquè l'efecte és més ràpid si movem l'aigua que no si la llencem al mar. Després l'integrador s'encarrega de fer variar el senyal (fer pujar o baixar el nivell del tanc) i aquesta acaba corresponent amb un efecte sobre l'escora. Després els quatre senyals s'uneixen i realmenten el sistema fent que l'escora resultant sigui pròxima a zero.



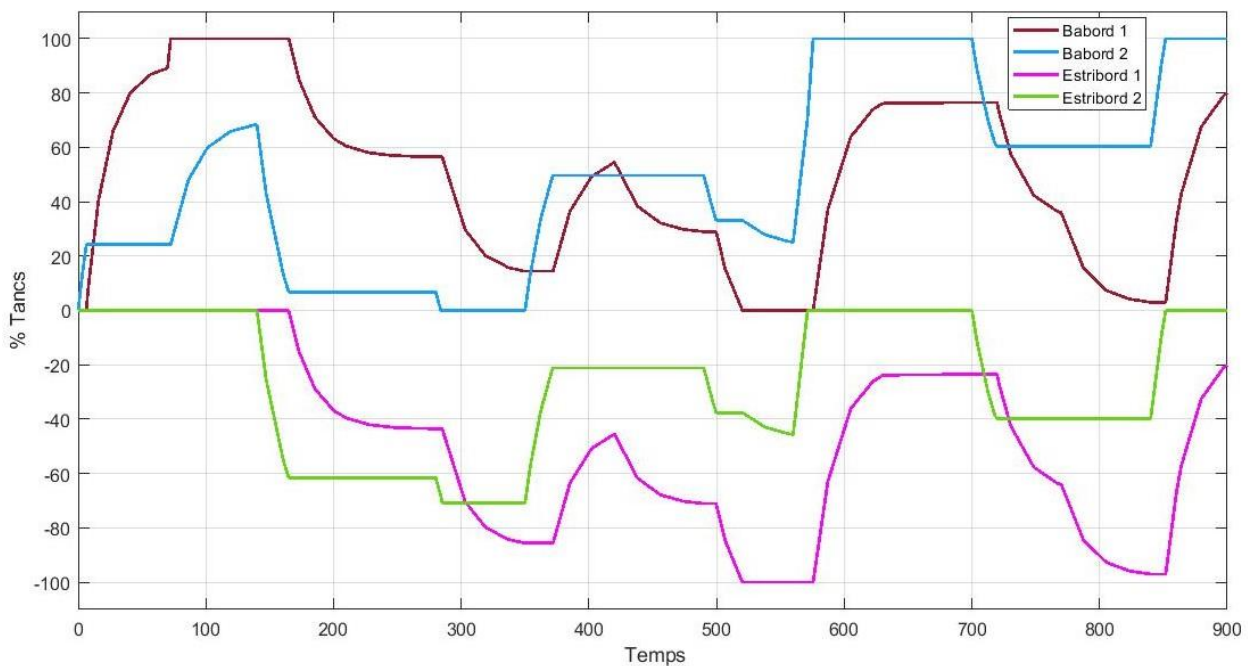
Il·lustració 17 – Controlador dels tancs #1 i #2 amb transvasament

Veient el controlador de la Il·lustració 15 i el que està sobre aquestes línies veiem la progressió en el disseny, tot i fer accions semblants només tenen una diferència, la velocitat d'actuació dels transvasaments que en el segon cas si que està contemplat. El fet d'haver creat el subsistema de control és per facilitar l'anàlisi del controlador en general i tenir una visió més simplificada dels dos processos, el

que controla els tancs i el que controla l'escora. També d'aquesta manera és molt més fàcil escalar el sistema i poder afegir els tancs 3, ja que l'estructura es manté i només cal obtenir els guanys que corresponen als nous tancs.

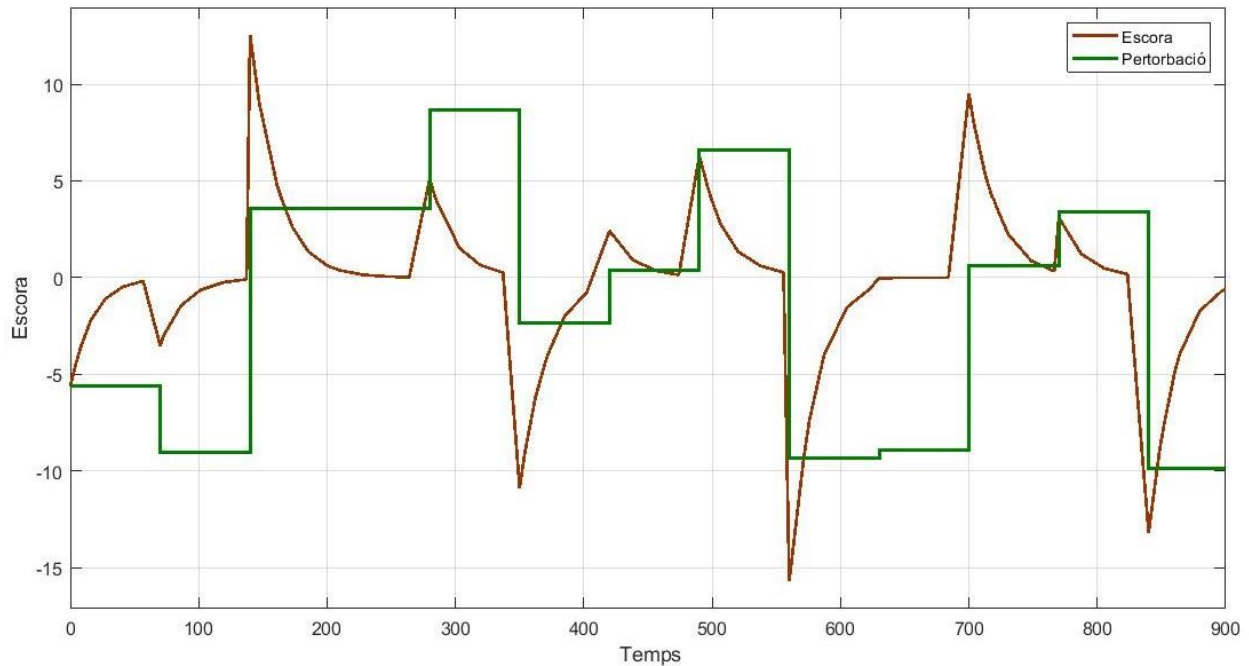
4.7. Comprovació de l'efectivitat del model complet en simulació

Per poder comprovar la seva efectivitat, primer es farà córrer sobre una simulació amb valors aleatoris a la pertorbació, per veure si respon sempre i intenta aproximar-se a 0° d'escora. Una vegada es tinguin els resultats s'observa en general totes les reaccions dels tancs i es procura veure si en alguna situació concreta la reacció del model no és l'adequada. És el sistema que s'ha utilitzat per afinar els models fins arribar a aquest que dóna uns resultats adaptables a la maqueta.



Gràfic 15 – Comportament dels tancs amb pertorbacions màximes de 10°

A continuació es mostra l'efecte del controlador sobre l'escora quan actuen les pertorbacions per comprovar les relacions entre el model i les pertorbacions aleatòries que modifiquen la seva estabilitat. L'escala de temps es la mateixa i les pertorbacions són les mateixes en els dos gràfics, així la correlació d'acció-reacció entre la planta i les pertorbacions es veu clarament.



Gràfic 16 – Comportament de l'escora amb perturbacions màximes de 10°

En aquest exemple es poden analitzar diferents situacions per veure que realment el model compleix els requisits que necessitem.

Aproximadament al segon 70 es pot veure com el tanc de babord 1 arriba fins al 100% i que la pertorbació ha fet descendir l'escora des de casi 0° fins a 3° , així que el tanc de babord 2 s'activa per corregir aquesta pertorbació tot i que hauria de ser el tanc de babord 1, però al haver-se omplert anteriorment aquest no pot actuar.

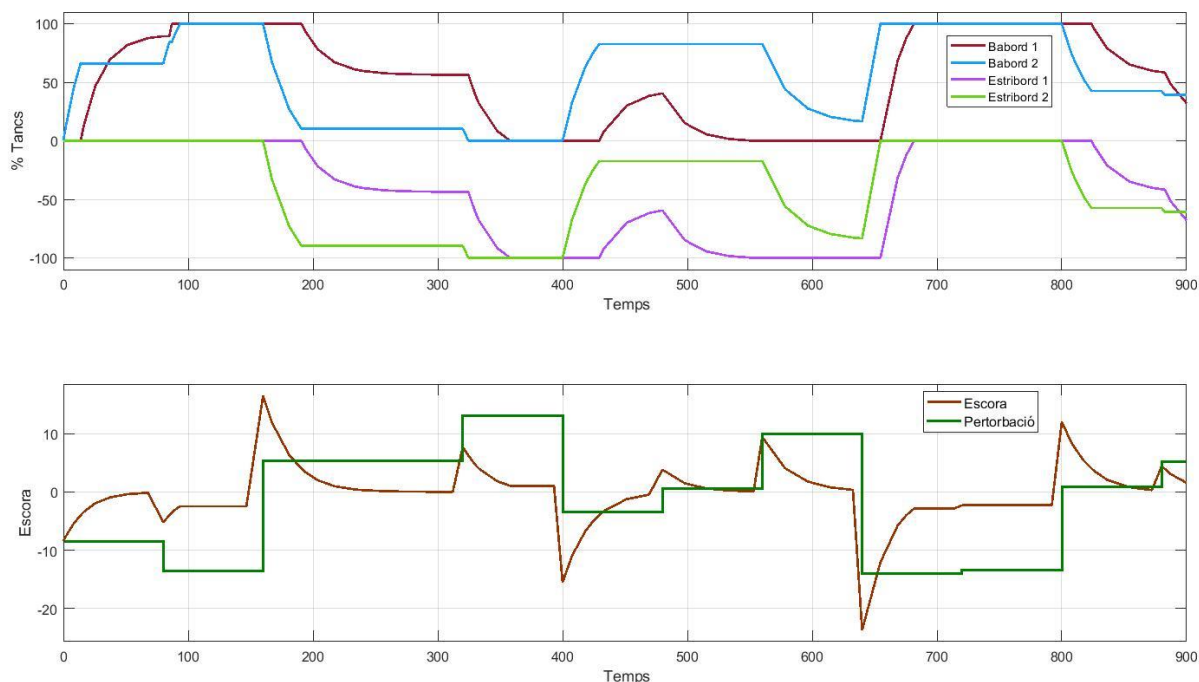
A partir del segon 150, es pot observar com l'escora passa d'un valor positiu fins al valor de 4° , i es pot comprovar el canvi entre els tancs, els 2 deixen de transvasar aigua i s'activen els 1 per transvasar-se aigua.

Entre els segons 550 i 600 succeeixen dos fets representatius que mostren la sincronia entre tancs per solucionar grans escores. Ja que en aquesta situació s'arriben a tenir -15° d'escora. Veiem que primer es transvasa aigua entre els tancs 2, però quan el d'estribord arriba al 0%, el de babord fa un canvi subtil en el pendent i comença a omplir-se des del mar fins que arriba al 100% de la capacitat. En aquest moment els tancs 2 no poden fer més, però el tanc d'estribord 1 està al 100% i el de babord al 0%, i aquest fet és contrari al que hauria de ser en aquest moment, per això quan el tanc 2 arriba al 100% activa els 1 que comencen a transvasar aigua fins arribar a l'estabilitat.

En resum aquest controlador aconsegueix que l'escora final amb perturbacions de 10° (un valor molt elevat) sempre acabi a 0° o molt propera. Així que donem per vàlid el funcionament del controlador, i repassem el llistat d'especificacions que compleix i ens asseguren de que no causa problemes a l'hora de passar-ho a la maqueta.

- Utilitzar tancs grans per escores grans, i tancs petits per escores petites
- No tenir tancs simultanis, excepte si es transvasa aigua entre costats
- No transvasar més aigua que la disponible en els tancs. En cas de necessitar més canviar a omplir del mar
- Diferenciació de velocitats de resposta entre omplir/buidar i transvasar

Ara per comprovar que en situacions límits el controlador no fa res que pugui perjudicar la integritat de la maqueta, es farà córrer una simulació amb valors entre 15° i -15° , valors que són superiors a la capacitat de resposta del controlador i la maqueta. Únicament es farà un anàlisi ràpid comprovant el funcionament i l'estabilitat de les respostes del controlador.



Gràfic 17 – Comportament del controlador amb pertorbacions de 15°

Com ens mostra el gràfic, en dues ocasions els tancs no poden contrarestar l'efecte de la pertorbació i el resultat és una escora residual.

En l'exemple anterior podíem observar que els tancs petits (els 1) s'omplien més i tenien més variacions que els grans, però en aquest cas al fer que les pertorbacions siguin massa grans com per que els tancs petits les puguin solucionar, en la majoria de situacions només s'activen els tancs 2 i quan aquests ja han arribat al límit superior o inferior s'activen els tancs petits.

Realitzades aquestes dues proves, es pot donar per vàlid el controlador, així que ara introduïrem aquest controlador a la maqueta perquè controli realment la planta.

Capítol 5. Programació del controlador i l'SCADA

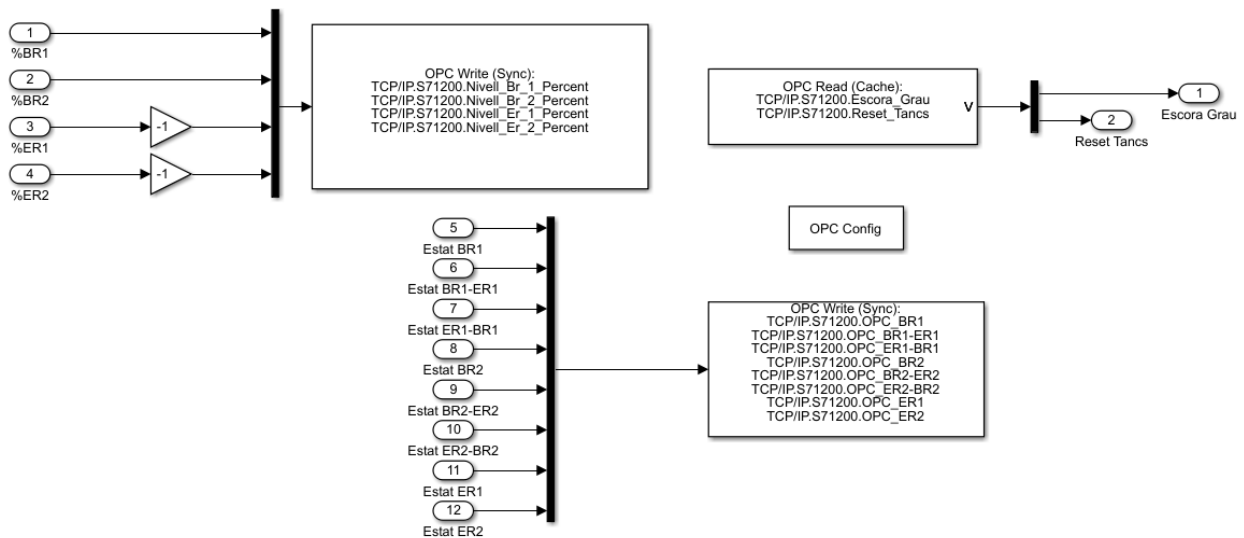
Una vegada es té el controlador dissenyat necessitem trobar el mètode per comunicar el Simulink amb el controlador amb el TIA Portal perquè controli els elements mecànics de la maqueta. També existeix la possibilitat de traslladar tota la programació del Simulink i fer-la compatible amb el TIA Portal, però la feina de conversió és molt major que la de comunicar els dos programes perquè comparteixin dades.

Per tant l'opció escollida es la de fer servir un servidor OPC que realitza la funció d'intermediari per poder compartir les dades entre el MATLAB-Simulink i el TIA PORTAL-PLC.

Després també s'ha dissenyat i programat una pantalla SCADA que permet controlar el PLC i observar el seu funcionament, per tant s'ha de comprovar que no hi haurà interferències entre la comunicació del PLC amb l'SCADA, entre el PLC i el servidor OPC, o entre el servidor OPC i MATLAB. Degut a que dins del mateix ordinador estan funcionant i connectats els tres dispositius (OPC, MATLAB, SCADA) la comunicació no sempre és fluida i sense errors de transmissió.

5.1. Adaptació del controlador per comunicar-lo amb el servidor OPC

A l'apartat anterior s'ha comprovat el funcionament del controlador i s'ha donat el vistiplau per introduir-lo al PLC i fer que s'encarregui del llast a la maqueta. Ara només s'ha afegit la programació necessària perquè pugui connectar-se amb el servidor OPC. Un dels motius més importants que ha motivat a fer l'elecció del servidor OPC és la facilitat de poder-lo connectar amb els blocs propis que facilita Simulink.



Il·lustració 18 – Detall de la connexió Simulink-OPC

L'únic que cal fer per establir la comunicació és introduir els blocs de configuració amb les dades del Servidor, i blocs d'escriptura o lectura de dades. Després s'introdueixen les dades que es volen enviar o rebre en el seu format correcte, i el servidor OPC s'encarrega de transmetre-les.

Aquesta imatge només mostra el detall de les connexions, ja que estan dins d'un subsistema per deixar el controlador més net. Així la imatge definitiva del controlador és aquesta, introduint la part que pertoca a la comunicació amb el servidor OPC.



Nom	Origen	Funció
Escora	PLC	Dona el valor real de l'escora perquè el controlador controli els tancs
Nivell dels Tancs	Simulink	Per visualitzar a l'SCADA el nivell
Valor de l'escora que activa els blocs integradors	Simulink	Per activar la bomba i les vàlvules pertinents
Reset de Tancs	PLC	Posar a 0% els tancs

Després de transmetre les dades, el controlador ignora tots els valors d'escora compresos entre 1.5 i -1.5 degut a les petites variacions del sensor, que fan que s'activi permanentment. Per tant per assegurar un duració dels components només s'activarà el controlador si l'escora supera aquest valor.

El servidor OPC utilitzat en aquest projecte es *KEPServerEX* de l'empresa Kepware en format versió de prova [VII], degut a ser una versió de prova només permet la connexió durant dues hores, després de reiniciar l'ordinador torna a permetre el seu ús.

Com el nostre PLC és una sèrie moderna de Siemens, la configuració amb l'assistent és molt senzilla i a continuació només cal seleccionar de la llista de variables del PLC les que volem escriure o llegir. Després d'això només cal configurar les IP's dels diferents elements que es comunicaran. En aquest projecte la IP del servidor i del MATLAB és la mateixa, per tant és molt més fàcil de configurar.

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate
Escora_Grau	MD290	Float	100
Nivell_Br_1_Percent	MD300	Float	100
Nivell_Br_2_Percent	MD310	Float	100
Nivell_Er_1_Percent	MD10	Float	100
Nivell_Er_2_Percent	MD1	Float	100
OPC_BR1	MD500	Float	100
OPC_BR1-ER1	MD540	Float	100
OPC_BR2	MD520	Float	100
OPC_BR2-ER2	MD550	Float	100
OPC_ER1	MD510	Float	100
OPC_ER1-BR1	MD560	Float	100
OPC_ER2	MD530	Float	100
OPC_ER2-BR2	MD570	Float	100
Reset_Tancs	M49.0	Boolean	100

Il·lustració 20 – Detall de les variables que comparteix el servidor OPC

5.3. Codi del PLC pel control automàtic via OPC

Una vegada tenim tota la informació tractada al controlador, aquest l'envia a través del servidor OPC al PLC perquè aquest actuï i activi les vàlvules que facin falta per reduir l'escora a zero.

La informació que rep el PLC del servidor OPC són els nivells dels tancs, que únicament serveixen per mostrar aquesta informació i els valors de l'escora corresponent a cada funció de transferència, sigui per omplir/buidar un tanc o per transvasar-ne l'aigua entre dos del mateix costat. Amb aquest valor d'escora, podem veure que si és positiu o negatiu es referirà a omplir o a buidar, per poder compensar aquesta escora, i en el cas de les funcions de transvasar com que estan diferenciades en els dos sentits, no cal fer aquesta diferència.



Il·lustració 21 – Exemple de control d'un tanc via OPC

Després, quan s'activa qualsevol de les vàlvules, la bomba també es posa en marxa per començar a bombejar aigua als tancs.

En el cas del transvasament com que el valor de l'escora només es refereix a un sentit de l'aigua, s'activa directament la bomba amb les vàlvules que corresponen a aquell tanc.



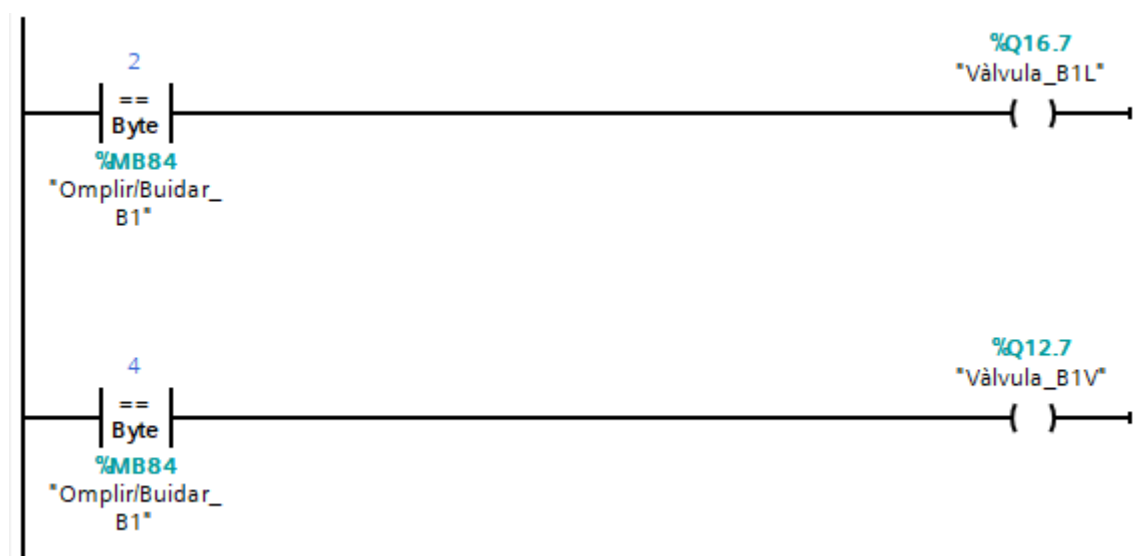
Il·lustració 22 – Exemple de control d'un tanc amb transvasament

Fent servir aquesta programació senzilla podem aconseguir que la informació que ens envia el MATLAB-Simulink a través del servidor OPC pugui controlar els tancs i la bomba per tal de controlar l'escora.

5.4. Codi del PLC pel control manual via SCADA

Un altre mètode per poder controlar la maqueta és de forma manual, fent servir una pantalla SCADA per operar manualment les vàlvules i la bomba per separat i poder fer proves o establir els tancs a un nivell concret.

La pantalla SCADA canvia el valor d'una variable relacionada amb cada tanc i li assigna un valor corresponent a omplir o buidar aquell tanc, aquesta variable, depenent del valor, activarà les vàlvules d'omplir o buidar corresponents.



Il·lustració 23 – Programació que controla les vàlvules manualment

Quant es compleixen els requisits de tenir les vàlvules activades, si es selecciona la bomba en mode omplir aquesta s'activarà i començarà a omplir el tanc o tancs seleccionats.

5.5. Programació de l'SCADA

Per poder gestionar la informació que ens proporciona el PLC i conèixer en tot moment quines funcions esta duent a terme, s'ha creat un SCADA amb una sèrie de pantalles que ens informaran o ens deixaran prendre el control en qualsevol moment.

Es divideix en tres seccions ben diferenciades:

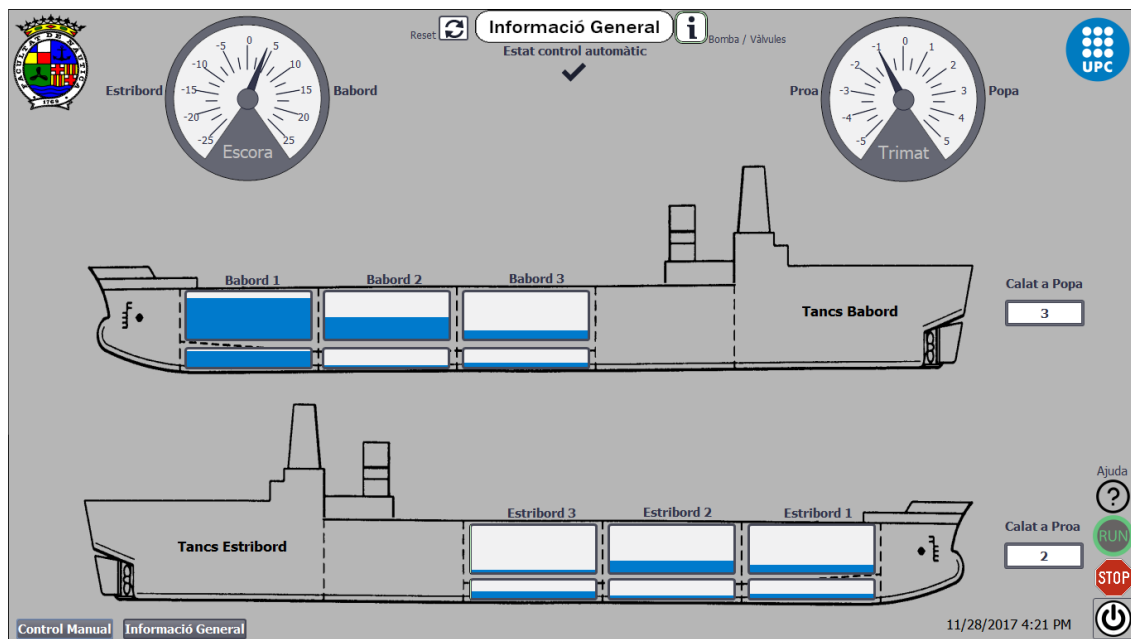
- Una pantalla informativa on només es poden consultar dades i veure com l'automatització funciona per controlar l'escora i el trimat.
- Una pantalla manual on es poden accionar tots els elements independentment de l'automatització. Es pot actuar sobre totes les vàlvules i sobre la bomba, veient en temps real el nivell dels tancs.
- Una pantalla per observar l'evolució temporal d'alguns paràmetres sobre una gràfica creada en temps real.

5.5.1. Pantalla d'informació

Per poder visualitzar la informació recollida pels sensors cal una pantalla on les dades apareguin de forma ben clara i visible. Per poder veure l'estat actual del vaixell i les modificacions sobre els tancs, escora o trimat que realitza el control automàtic. Per això s'ha dissenyat una pantalla a l'SCADA que mostra tots aquests valors de forma senzilla.

Per fer-ho, a la pantalla es tenen dos indicadors d'agulla que mostren en temps real l'angle d'escora i de trimat, amb un indicador digital que mostra la mateixa informació escrita. També es mostra un esquema del vaixell on es veuen tots els tancs de llast amb uns indicadors per veure el nivell d'aigua que tenen a dins. Finalment s'ofereix el càlcul del calat a proa i a popa.

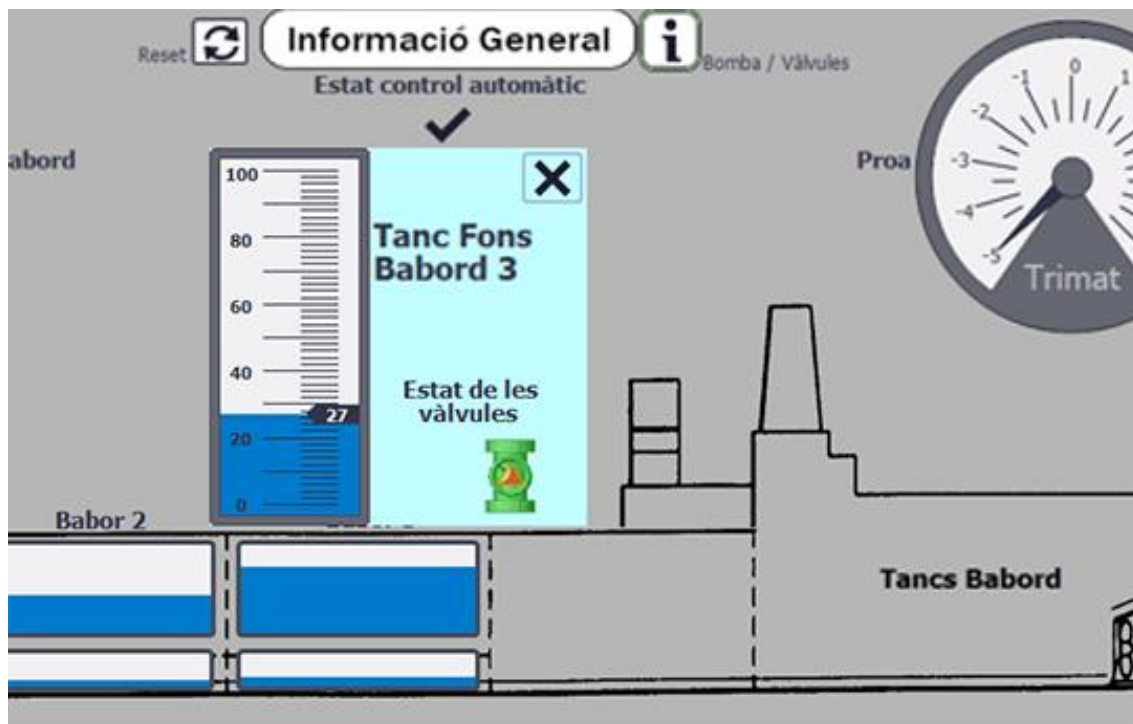
Per saber si el control automàtic està disponible i operatiu hi ha un senyal gràfic que mostra l'estat del control automàtic.



Il·lustració 24 – Pantalla d'informació general

Les úniques interaccions disponibles en aquesta pantalla son:

- Els botons de sortida de l'SCADA, l'encesa/aturada del PLC i el d'informació. El seu funcionament està explicat a l'apartat "Pantalla de control manual"
- El botó de *Reset* que reinicia el nivell dels tancs i els torna a zero. Aquesta opció existeix per corregir les desviacions entre el Matlab i la maqueta.
- Una pantalla emergent que apareix quan es pressiona sobre un tanc i que informa del nivell d'aigua amb més precisió i de l'estat de les vàlvules en aquell tanc. Tot de forma informativa i sense poder manipular les vàlvules.



Il·lustració 25 – Exemple d'informació que es mostra sobre un tanc

A la il·lustració superior es pot observar el tipus d'informació que es mostra en un cas concret on l'angle de trimat és de -5° d'inclinació, el control automàtic està activat i el tanc de doble fons 3 a babord té un 27% de la capacitat. També es pot observar que la vàlvula d'entrada està activa per tant hi segueix entrant aigua.

5.5.2. Pantalla de control manual

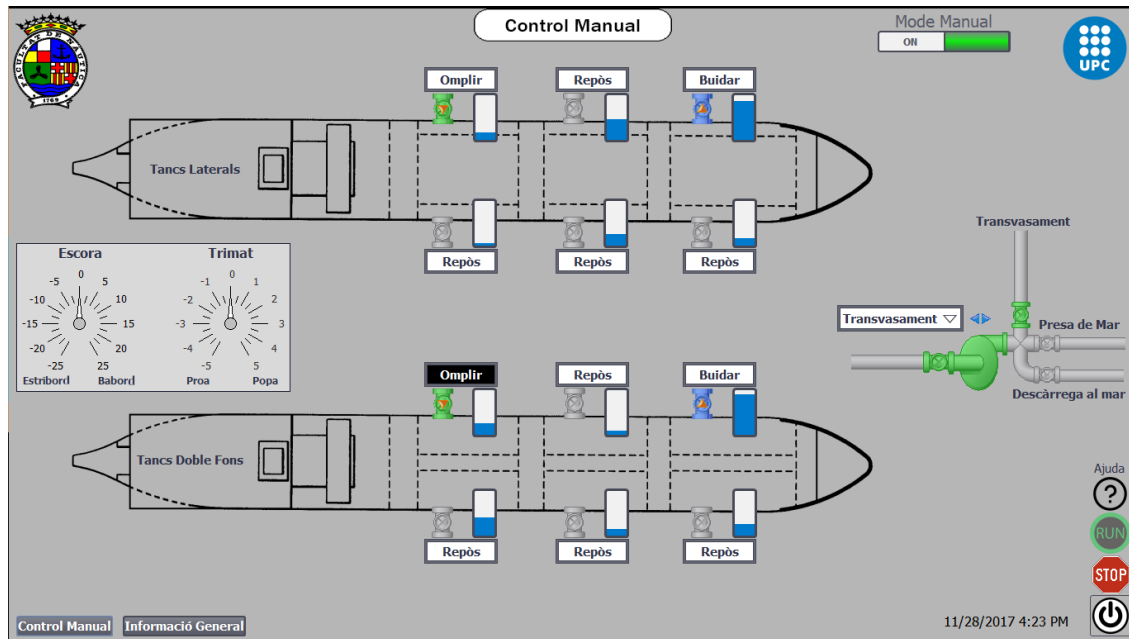
Els principals objectius d'aquest projecte eren la creació d'un control automàtic per una maqueta de portacontainers. Però sempre és recomanable poder tenir control personal i no automatitzat a les funcions de llast, en cas d'emergència o de fallada del sistema. Si no es pot anular l'acció automàtica i aquesta està funcionant erròniament es pot causar un problema major al que s'ha solucionat amb la automatització.

Per això s'ha creat una pantalla per l'SCADA on es pot desactivar l'acció del control automàtic i accionar manualment totes les parts involucrades en el sistema de llast. Com controlar les vàlvules per omplir o buidar els tancs i decidir si es vol omplir amb aigua de mar, buidar cap al mar o transvasar l'aigua entre tancs.

El disseny que s'ha utilitzat és visual, seguint un sistema semblant a la pantalla d'informació, es veu un esquema en planta del vaixell on estan simbolitzats els tancs laterals i els de doble fons, en dos parts diferenciades. Al costat de cada tanc hi apareix un símbol de vàlvula que indica l'estat de les vàlvules

relacionades amb aquell tanc, un indicador de nivell del llast i finalment un cartell on es selecciona que es vol fer amb el tanc, si omplir-lo o buidar-lo.

Quan es selecciona la opció desitjada en els cartells informatius de cada tanc, la vàlvula canvia de color depenent de la opció seleccionada. Si està seleccionada la opció de omplir, la vàlvula es tornarà verda i apareixerà una fletxa que indica el sentit de l'aigua a través de la vàlvula. En cas de que es seleccioni la opció de buidar, la vàlvula es tornarà de color blau i la mateixa fletxa canviarà de sentit per indicar que l'aigua anirà cap a fora del tanc.

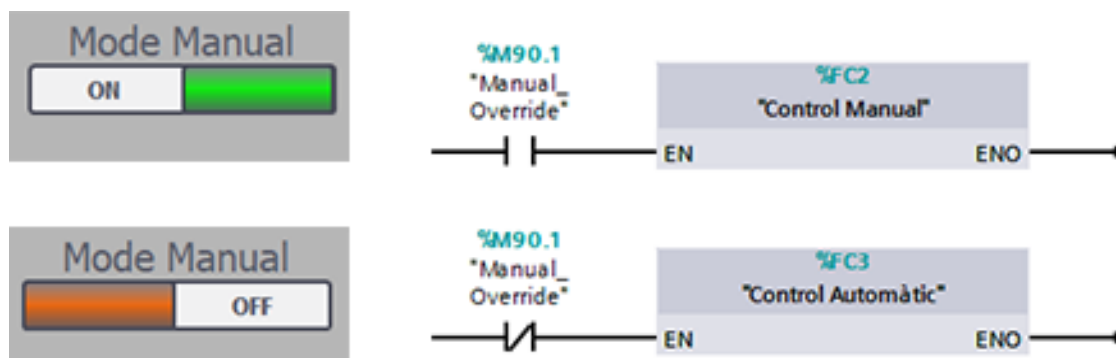


Il·lustració 26 – Pantalla de control manual

Per operar la bomba, no es pot fer directament, sinó que seguint la dinàmica d'actuació de les vàlvules s'ha de canviar un cartell on es pot seleccionar si omplir, buidar o transvasar. Aquesta opció facilita que el conjunt de vàlvules (presa de mar, descàrrega al mar i omplir tancs) encarregades de moure l'aigua s'operin correctament. Tot això va acompanyat de mesures de seguretat internes per evitar una mala operació de la bomba, ja que la bomba instal·lada pot treballar en buit però no es molt recomanable.

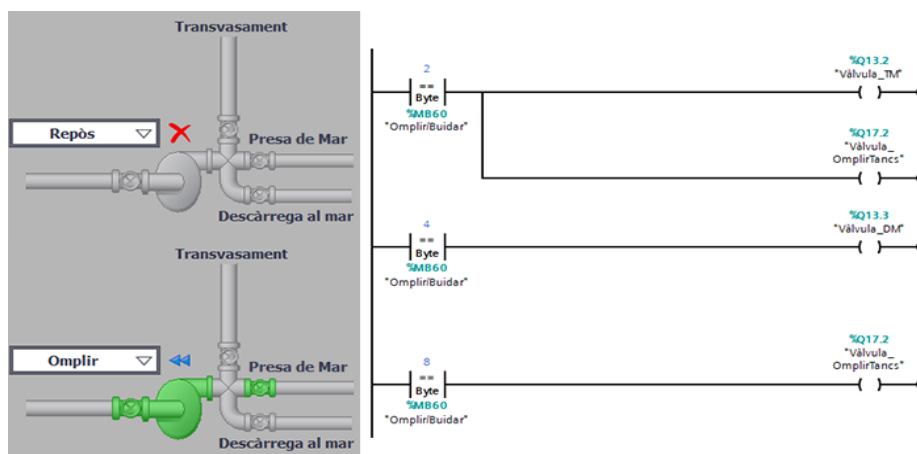
Els sistemes de seguretat inclosos en la pantalla d'operació manual són els següents:

- Un botó per seleccionar la operació manual i desactivar l'automàtica. Sense activar-ho aquesta pantalla no està operativa.



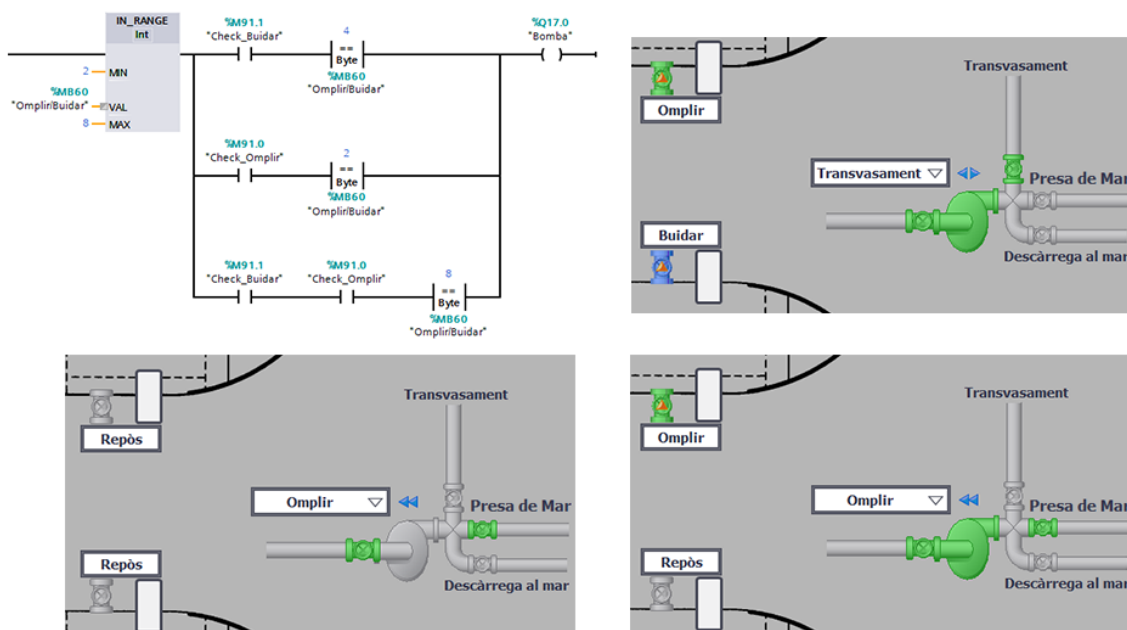
Il·lustració 27 – Selecció del control manual

- Selecció automàtica de vàlvules segons la operativa de llast. Les vàlvules s'activen segons l'ordre de l'operari.



Il·lustració 28 – Operativa de vàlvules a partir dels rètols d'Omplir, Buidar i Transvasar

- Activació de la bomba únicament quan les vàlvules als tancs estan correctament operades. Quan hi ha alguna vàlvula en posició de omplir, deixa operar la bomba per omplir tancs. El mateix per buidar, i per transvasar ha d'haver-hi almenys una vàlvula en cada posició.



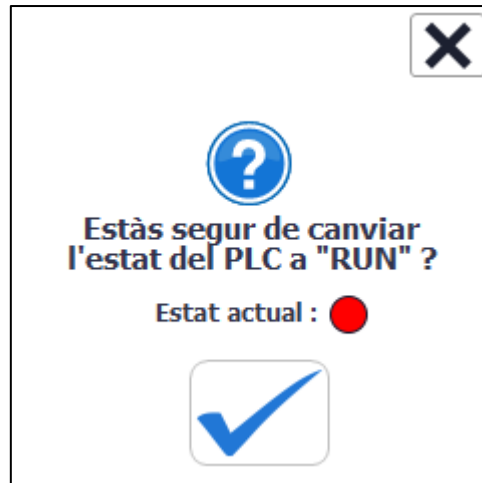
Il·lustració 29 – Seguretats de la bomba de llast

- Posada en mode STOP del PLC en cas d'emergència. Aquesta seguretat està present a totes les pantalles, en cas d'error o d'una mala actuació es pot aturar l'acció del PLC completament. També es pot reactivar el PLC o sortir de l'SCADA.



Il·lustració 30 – Botons de control del PLC i sortida de l'SCADA

Per reactivar el PLC apareix una pantalla emergent que confirma la intencionalitat de reprendre l'acció del PLC.



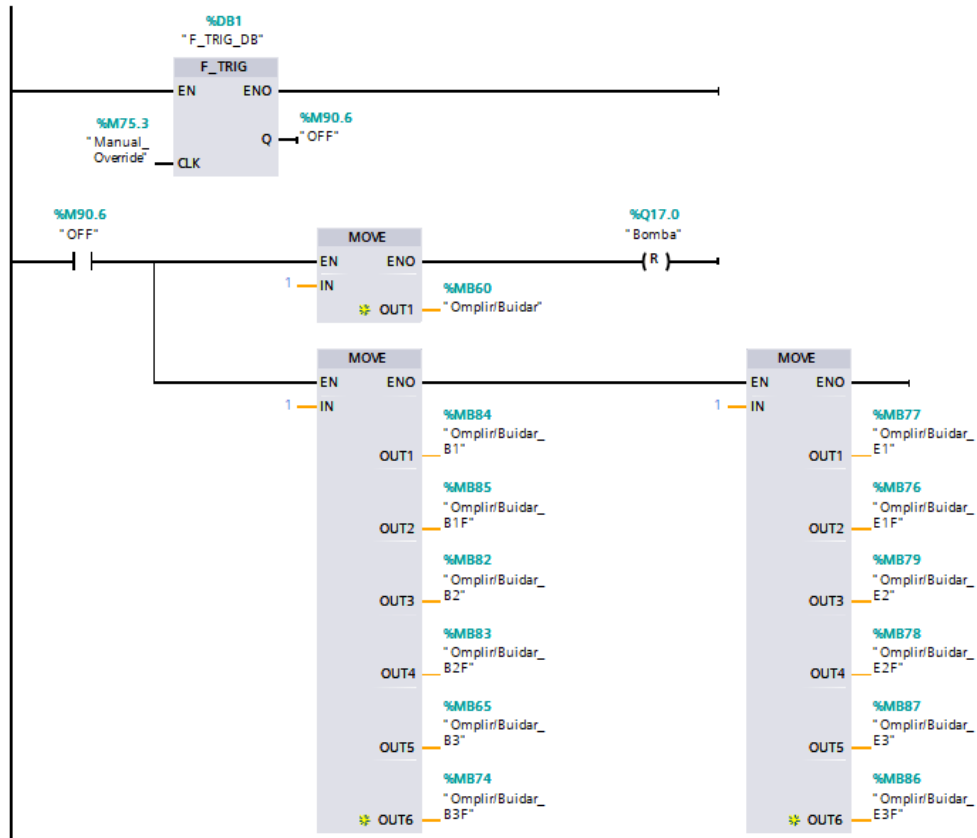
Il·lustració 31 – Pantalla emergent on informa de l'estat del PLC i permet activar-lo

- Botó d'ajuda. També present a totes les pantalles, la seva única funció és explicar les interaccions amb les pantalles.



Il·lustració 32 – Pantalla emergent d'ajuda

- Desactivació de totes les vàlvules i de la bomba de forma redundant per evitar influències durant l'actuació del mode automàtic.



Il·lustració 33 – Desactivació de totes les vàlvules i de la bomba al sortir del mode manual

Capítol 6. Conclusions

En aquest treball s'ha tornat a posar operativa una maqueta de portacontenidors desenvolupada en un TFG anterior i s'ha millorat la instrumentació per poder fer experiments avançats de modelització i control. A banda de la substitució de diferents sensors i la inclusió de nous (incloent un processador Arduino), s'ha millorat el sistema SCADA augmentant les seves capacitats, i s'ha aconseguit establir una comunicació efectiva entre PLC, SCADA i MATLAB/SIMULINK per mitjà d'un servidor OPC, la qual cosa ha millorat les prestacions de la maqueta i ha obert un ampli ventall per a l'experimentació amb tècniques avançades de modelització i control per a futurs estudiants.

Pel que fa a la modelització, s'ha obtingut un model matemàtic multivariable capaç de descriure amb fiabilitat el comportament dinàmic de la maqueta, és a dir, l'evolució dels nivells dels diferents tancs i els seus efectes sobre l'escora i el trimat en funció de les tensions aplicades sobre vàlvules i bomba. Aquest model ha estat validat experimentalment mitjançant la comparació dels resultats experimentals amb els resultats obtinguts per simulació. Val a dir que alguns dels sensors de nivell estan defectuosos i que per a aconseguir desenvolupar el model s'ha hagut d'estimar la seva sortida.

Cal fer èmfasi en la dificultat d'obtenir un model matemàtic precís. El procediment ha estat llarg i ha presentat moltes dificultats en cadascuna de les seves etapes. El primer pas ha estat l'adaptació dels sensors per a que les seves dades poguessin ser recollides i analitzades. A continuació, ha calgut aplicar coneixements teòrics en la selecció de les entrades, sortides i variables internes del model de la planta i en l'estructura del model (decidir si la planta té acció integral o no, per exemple). Després amb totes les dades recollides en desenes de proves, l'obtenció del model ha estat un procediment d'anàlisi del comportament amb una sintonització dels paràmetres a base de prova/error fins donar amb uns valors pròxims als reals. Aquesta dinàmica d'obtenció de models és extrapolable a qualsevol altre planta industrial on es vulgui controlar un procés industrial en concret.

Pel que fa al control, aquesta part ha estat igual de profitosa que la primera. Durant el projecte s'han considerat un nombre molt elevat d'estratègies de control. Aquest procés de trobar el controlador adequat, ha portat moltes hores d'anàlisi de la maqueta, de les seves possibilitats i les relacions entre els models simulats i els reals. Per això es destaca la importància de comptar amb un bon model. Al final s'ha decidit implementar només el control sobre l'escora per ser aquesta la variable més rellevant del comportament dinàmic. Si en un futur es vol implementar un control sobre el trimat i el calat, només cal replicar l'actual controlador però prenent les senyals corresponents. El controlador dissenyat està basat en unes regles de decisió amb l'objectiu d'optimitzar el funcionament dels actuadors (minimitzar el temps d'operació de vàlvules i bomba). Pel que fa a l'optimització del temps de resposta, al ser l'operació de les vàlvules tot-res el comportament ja és que quan s'omple cadascun dels tancs es faci el més ràpid possible que permet la instrumentació instal·lada.

Pel que fa a la implementació del controlador i aplicació a la maqueta física, en aquest pas és on més problemes hi ha hagut de tot el projecte. Primerament a l'hora de decidir quin tipus de model volíem fer servir per representar la maqueta, i a partir d'aquí com portar aquest controlador a la maqueta real. Haver de treballar amb diferents plataformes on es comparteixen dades a temps real entre totes elles ha estat un dels grans inconvenients, degut a que no es molt comú la implementació de controladors en una plataforma el seu trasllat en una altra. Això ha portat a una feina exhaustiva de documentació per buscar els mètodes més emprats a la indústria i els que millors resultats donen, per facilitar d'implementació o per rellevància tècnica.

La última conclusió, és sobre el concepte del projecte. En inici la maqueta estava construïda i tot el que hi havia era desconegut o amb una lleugera idea del seu funcionament. L'haver d'aprendre el treball realitzat anteriorment i proposar de crear un projecte a sobre és una idea complicada. Per aquest motiu s'ha decidit documentar totes les particularitats i canvis/millores realitzats a la maqueta per tal que futurs estudiant no hagin de passar per les mateixes dificultats i el llarg procés de familiarització amb la maqueta. Aquest document és el Manual de Servei disponible a l'annex d'aquesta memòria.

Finalment, és interessant constatar la gran quantitat de temes que s'han tractat en aquest projecte: la instrumentació electrònica, creació de pantalles SCADA, programació en Arduino, programació en TIA Portal, programació del Simulink, creació i configuració del servidor OPC. El nivell obtingut en aquestes matèries al final del projecte és molt superior al inicial. Així, la recerca d'informació, manuals i exemples ha estat un dels grans avenços del projecte.

Com a possibles línies futures de treball es pot plantejar l'assaig de diferents tècniques d'estimació òptima de models, como ara els algorismes d'identificació paramètrica per mínims quadrats o l'estimació de l'estat mitjançant filtres de Kalman. Si es millora la instrumentació de la maqueta posant vàlvules més complexes i substituint els sensors de nivell una altra línia podria ser el disseny de controladors robustos i difusos. Finalment, també es pot considerar el desenvolupament de pràctiques docents o demostracions per als estudiants de control de les diferents titulacions de grau i màster.

Referències i Bibliografia

Referències al text

- [I] https://en.wikipedia.org/wiki/MV_Cougar_Ace
- [II] [https://en.wikipedia.org/wiki/MV_Cougar_Ace#/media/File:Cougar_Ace_on_side_\(starboard_side\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/MV_Cougar_Ace#/media/File:Cougar_Ace_on_side_(starboard_side).jpg)
- [III] <https://www.sparkfun.com/products/13959>
- [IV] <https://img2.banggood.com/thumb/view/oaupload/banggood/images/CD/2E/707cc57b-02f0-8189-5420-d96fccb486b1.jpg>
- [V] <https://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050>
- [VI] <https://www.makerelectronico.com/wp-content/uploads/2017/06/MPU600-Acelerometro-y-Giroscopio-3-ejes-8.jpg>
- [VII] <https://www.kepware.com/en-us/products/kepserverex/>
- [VIII] https://http2.mlstatic.com/modulo-sensor-de-nivel-de-agua-para-arduino-pic-D_NQ_NP_692211-MCO20513688875_122015-F.jpg

Bibliografia

Llibres

Automatització

- [1] Espinosa Malea, José Manuel. *Sistemas programables avanzados*. MARCOMBO FORMACIÓN, 2016
- [2] Ortiz, Sergio; Espinosa, José Manuel. *Sistemas secuenciales programables*. MARCOMBO FORMACIÓN, 2014
- [3] Peciña Belmonte, Luis. *Programación de Autómatas Siemens S7-300 y S7-1500*. AWL y SCL. MARCOMBO FORMACIÓN, 2017
- [4] Jon Stenerson; David Deeg. *Programming Siemens Step 7 (Tia Portal), a Practical and Understandable Approach*. Publicis MCD Verlag, Germany, 2015

Control

- [5] Kuo, B.C. *Sistemas de control automático*. Prentice Hall Hispanoamericana, Mexico, 1996
- [6] Ogata, Katsuhiko. *Ingeniería de control moderna. 5a ed.* Pearson Educación, España, 2010

Instrumentació

- [7] Boyd, G.; Jackson, L. *Instrumentation and control systems. 5th ed.* Adlard Coles Nautical, United Kingdom, 2013.

Apunts

Sistemes de control automàtic i xarxes informàtiques del vaixell

- [8] Fernández, Rosa M. *Teoría de Sistemas*. UPC, 2016

Control i regulació automàtica

- [9] Romero, Sergio. *Apuntes assignatura*. ESAII-UPC, 2015

- [10] Vilà, Ricard. *Dinàmica de Sistemes*. UPC

Extra curriculars

- [11] Fernández, Rosa M. *MATLAB. Fundamentals and Applications*. UPC, ETSETB

- [12] Fernández, Rosa M. *Control borros (Fuzzy)*. UPC, 2017

Normativa

- [13] BOE-A-2002-18099. *Reglamento electrotécnico para baja tensión*. Ministerio de Ciencia y Tecnología, España, 2002

Dipòsit acadèmic UPC

- [14] Calvo Bosque, Álvaro; Domínguez Torres, Marc. *Control de la estabilidad de un modelo de buque portacontenedores en operaciones de estiba*. Projecte fi de grau, FNB, 2015.

Disponible a: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/81498>

- [15] Alva Howes, Mauricio; Camas Delgado, Alejandro; García Hidalgo, Néstor; Costa Castelló, Ramon. *Operación óptima de la planta de los 4 tanques*. Comunicació de congrés, CEA-IFAC, 2014

Disponible a: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/25358>

- [16] Planells Valencia, Antoni. *Control d'un manipulador redundant basat en un model dinàmic obtingut per identificació*. Projecte fi de grau, ETSEIB, 2014

Disponible a: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/25016>

Manuals

[17] SIMATIC, S7, Controlador programable S7-1200, Manual de sistema, 11/2009, Numero: A5E02486683-02. Disponible a:

<https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacio/simatic/Documents/S71200-MANUAL%20DEL%20SISTEMA.PDF>

[18] MATLAB, R2017B, Mathworks. Getting Started with MATLAB. Disponible a:

https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf

[19] Simulink, User's Guide, MATLAB&SIMULINK, R2017B, Mathworks. Simulink - User Guide. Disponible a:

https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/simulink/sl_using.pdf

[20] KEPServerEX V6 – Kepware. User's Manual. Disponible a:

<https://www.kepware.com/en-us/products/kepserverex/documents/kepserverex-manual/>

[21] SCADA System, SIMATIC WinCC. The scalable and open SCADA system for maximum plant transparency and productivity. Disponible a:

https://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/brochure/en/df_fa_i10077-00-7600_ipdf_wincc_systemoverview_en.pdf

Planes web d'interès

[22] *Youtube.com*

WinCC TIA PORTAL 1/12: Asistente pantalla HMI [Consulta 07/11/2017]. Disponible a:

<https://youtu.be/J7iDbXVOoUY>

WinCC TIA PORTAL 2/12: Conexión entre PLC y pantalla (WinCC Basic) [Consulta 07/11/2017]. Disponible a:

<https://youtu.be/64Z9gtt0pl8>

WinCC TIA PORTAL 3/12: Imagenes agregar y navegar (WinCC Basic) [Consulta 07/11/2017]. Disponible a:

<https://youtu.be/415sYfcGjfM>

WinCC TIA PORTAL 4/12: Objetos Basicos (WinCC Basic) [Consulta 08/11/2017]. Disponible a:

<https://youtu.be/kp6lfW-ljkk>

WinCC TIA PORTAL 5/12: Elementos Botón e interruptor (WinCC Basic) [Consulta 08/11/2017]. Disponible a:

<https://youtu.be/IDXccx8y-6Y>

WinCC TIA PORTAL 6/12: Elementos Barra y Campo ES (WinCC Basic) [Consulta 08/11/2017]. Disponible a:

<https://youtu.be/pHAPGW7mDhw>

WinCC TIA PORTAL 7/12: Simular S7 1200 con PLCSIM y simultáneamente con pantalla HMI WinCC [Consulta 09/11/2017]. Disponible a:

<https://youtu.be/YZYDbmB0Ar4>

WinCC TIA PORTAL 8/12: Elementos Campo ES simbólico, gráfico, fecha y hora (WinCC Basic) [Consulta 09/11/2017]. Disponible a:

<https://youtu.be/0coegYMu7V8>

WinCC TIA PORTAL 9/12: Elementos Confort Librerías de símbolos, deslizador, indicador y reloj [Consulta 09/11/2017]. Disponible a:

<https://youtu.be/7JaxiFdxdl>

WinCC TIA PORTAL 10/12: Animaciones, visibilidad, apariencia y movimientos [Consulta 10/11/2017]. Disponible a:

<https://youtu.be/3l2xfF9H4JI>

WinCC TIA PORTAL RT Advanced: Crear, configurar y transferir sistema PC (pantalla de ordenador) [Consulta 10/11/2017]. Disponible a:

https://youtu.be/pWLgUD2q_Po

Imágenes emergentes WinCC RT Advanced TIA Portal [Consulta 10/11/2017]. Disponible a:

<https://youtu.be/yhVSqnxcp9s>

Integration of Simatic S7-1200 with the Matlab Simulink environment Configuration [Consulta 31/01/2018]. Disponible a:

<https://youtu.be/PNXhHBIXywc>

Communication between Matlab and Siemens PLC Using TCP [Consulta 31/01/2018]. Disponible a:

<https://youtu.be/mYXUWUf7LxU>

CONEXIÓN PLC SIEMENS S7-1200 CON MATLAB POR MEDIO DE SERVIDOR OPC [Consulta 31/01/2018]. Disponible a:

https://youtu.be/1_AQ-7QU7sl

TIA PORTAL-KEPSERVER-MATLAB [Consulta 02/02/2018]. Disponible a:

<https://youtu.be/yTchYF03yiA>

[23] www.luisllamas.es

Determinar la orientación con Arduino y el IMU MPU-6050 [Consulta 14/06/2017]. Disponible a:

<https://www.luisllamas.es/arduino-orientacion-imu-mpu-6050/>

Cómo usar un giroscopio en nuestros proyectos de Arduino [Consulta 14/06/2017]. Disponible a:

<https://www.luisllamas.es/como-usar-un-giroscopio-arduino/>

Medir la inclinació con IMU, Arduino y filtro complementario [Consulta 14/06/2017]. Disponible a:

<https://www.luisllamas.es/medir-la-inclinacion-imu-arduino-filtro-complementario/>

El bus I2C en Arduino [Consulta 17/06/2017]. Disponible a:

<https://www.luisllamas.es/arduino-i2c/>

Medir distancia con Arduino y sensor de ultrasonidos HC-SR04 [Consulta 29/06/2017]. Disponible a:

<https://www.luisllamas.es/medir-distancia-con-arduino-y-sensor-de-ultrasonidos-hc-sr04/>

[24] www.arduino.cc

PWM [Consulta 02/07/2017]. Disponible a:

<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>

if...else . Control Structure [Consulta 02/07/2017]. Disponible a:

<https://www.arduino.cc/en/Reference/If>

[25] ca.wikipedia.org/

Gyroscope [Consulta 14/06/2017]. Disponible a:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>

Accelerometer [Consulta 14/06/2017]. Disponible a:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Accelerometer>

SCADA [Consulta 07/11/2017]. Disponible a:

<https://en.wikipedia.org/wiki/SCADA>

Open Platform Communications [Consulta 01/02/2018]. Disponible a:

https://en.wikipedia.org/wiki/Open_Platform_Communications

Annex – Manual de Servei

Aquest annex es presenta com un document extern al treball fi de grau. La finalitat de la creació d'aquest annex és perquè serveixi com a Manual de Servei per a possibles millores en la maqueta sobre la qual s'ha treballat. Aquest annex inclou informació que s'ha decidit no posar en la memòria del TFG per ser excessivament detallada, d'aquesta manera servirà de base i com a ampliació de tots els procediments que s'han seguit durant la realització d'aquest projecte fi de grau.

A1. Estat inicial

La maqueta, després de la seva presentació en l'anterior TFG va ser desmuntada, en el sentit de que: es va buidar l'aigua, es va desconnectar tota la canalització des de les vàlvules fins als tancs i es van desconnectar els sensors mitjançant els connectors que té per aquest ús.

Degut al ús intensiu que se li donaria, les canalitzacions anaven identificades amb un codi de colors per unir vàlvules i entrades dels tancs, algunes etiquetes estaven deteriorades i van haver de ser canviades durant el temps que s'anaven connectant tots els tubs.

La part hidràulica és la que més problemes ens va donar amb les vàlvules, la bomba i el sensor de nivell. La part elèctrica i totes les connexions no van patir cap desperfecte amb el pas del temps. Els sensors d'escora i trimat funcionaven i el PLC tenia tot el cablejat correctament col·locat.

Però la part hidràulica com comentàvem és la que més ha patit els efectes del temps, les vàlvules van quedar-se inoperatives degut als residus a l'aigua, un sensor de nivell dona problemes amb la lectura, i la bomba de llast va quedar-se inoperativa durant les primeres proves amb la maqueta.

1.1. Vàlvules

El primer defecte de funcionament de la maqueta en posar-la en marxa per primer cop va ser que segons es mostrava a la pantalla del TIA Portal i a les sortides del PLC hi havia vàlvules que haurien d'activar-se i escoltar-se quan canvien d'estat entre obertes i tancades. El problema va venir quan només se sentien algunes vàlvules i la resta quedaven immòbils davant les ordres.

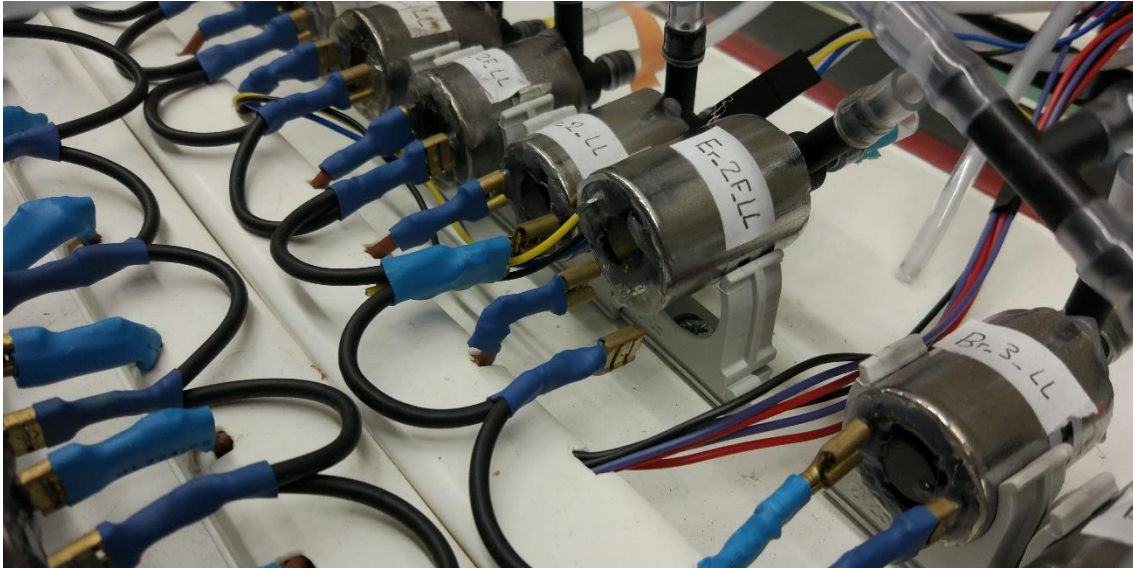
El primer pas a comprovar per veure què era el que fallava, i no deixava que les vàlvules s'obriessin era comprovar si hi havia connectivitat entre la sortida de relé del PLC i les vàlvules, i també si la connexió a terra tancava el circuit. Amb el tester es comprova la connectivitat entre la sortida dels relés i el pol positiu de la vàlvula, i després el mateix procediment entre el pol negatiu de la vàlvula i la connexió a terra de la font d'alimentació. Aquesta prova va demostrar que totes les connexions elèctriques estaven en bon estat i no hi havia cap cable que s'hagués sortit del lloc.

La segona comprovació va ser treure les vàlvules una a una i comprovar quines eren les que fallaven i quines les que funcionaven, per això es van anar connectant a 12V directament esperant escoltar l'obertura o el tancament. La gran majoria d'elles no van mostrar cap signe de funcionar per tant s'havien de reparar.

El motiu més raonable era que al haver fet servir aigua de l'aixeta i havent afegit clor per evitar creixement d'algues, s'havien creat dipòsits càlcics a l'interior de la vàlvula i això impedia el seu funcionament.

Per tant la forma de desencallar-les va ser fent córrer aigua en sentit contrari, excitant i desexcitant mentre es sacsejava la vàlvula. Després de provar-ho unes quantes vegades totes les vàlvules van quedar operatives.

Abans de tornar-les a muntar es va comprovar que totes les etiquetes estiguessin en bon estat i es van restaurar o canviar les que estaven en mal estat per evitar una possible futura equivocació.



Il·lustració 34 – Detall de les vàlvules

Per fer la comprovació final es van instal·lar totes les vàlvules, i també es van comprovar totes les línies de llast per veure que no n'hi hagués cap obstruïda amb la bomba fent circular aigua pel sistema.

A l'esquema inicial hi havia una vàlvula anomenada "*Llenado de tanques*" que ha sigut eliminada per tenir una funció redundant, ja que si cap vàlvula individual del tanc està oberta, per molt que s'activi aquesta vàlvula l'aigua no fluirà. Per tant, per simplificar l'esquema i evitar problemes, s'ha desconnectat i tret de la seva posició.

1.2. Trencament de la bomba de llast

Durant les proves de les vàlvules i línies de llast, en un moment donat l'aigua va deixar de circular per les vàlvules en proves. Tot i provar a les vàlvules ja comprovades no hi havia cap resultat, així que el motiu del problema havia de ser un problema a la bomba. Per tant es va provar la bomba aspirant aigua del tanc i traient-la al tanc per veure el resultat. La prova va confirmar que la bomba seguia funcionant, perquè es notava el gir, però que no en sortia aigua per la sortida.

Per tant el problema havia d'estar relacionat amb la part de bomba perquè la part elèctrica seguia funcionant correctament.

Com que la bomba era de petites dimensions, i feia impossible el seu manteniment o reparació, es va procedir a adquirir una altra bomba amb més potencia i fiabilitat que aquesta per donar una vida molt més llarga a la maqueta.

1.3. Sensor de nivell defectuós

La maqueta compta amb quatre sensors de nivells que van introduir-se a la maqueta durant la fase de construcció. En els tancs 1 i 2, a babord i estribord, dins del tanc hi ha aquests sensors de nivell. El problema resideix en que aquests sensors tenen unes lectures molt errònies, alguns tenen una precisió millor que els altres, sent el que pitjor mesura el tanc d'estribord 1, ja que quan s'omple, la mesura puja sense sentit i després es manté durant hores marcant un nivell d'aigua al voltant del 70% fins que es recupera.



Il·lustració 35 – Sensor de nivell dels tancs [VIII]

Com que els sensors no poden ser canviats amb facilitat, es deixaran instal·lats però es pren nota de que les seves lectures no poden ser donades per vàlides en cap cas. És cert que en alguns tancs si que s'aproximen a la realitat, però això no implica que comencin a donar problemes semblants al del tanc d'estribord 1.

1.4. Fuita d'aigua

Durant les proves dels sensors de nivell, es va observar que el tanc lateral d'estribord 2 té una fuita a la part superior, cosa que es va observar quan es va omplir fins a dalt per veure quin era el valor màxim del sensor. És possible que la fuita no es produeixi exactament per la part superior, ja que no s'aprecia d'on surt l'aigua, però si que acaba apareixent aigua al compartiment de càrrega després d'haver omplert els tancs fins a la part superior i haver mantingut aquella aigua a dins dels tancs.

No se li dóna molta importància perquè a la pràctica els tancs no s'ompliran fins a l'extrem que pugui arribar a sortir aigua per la part superior, sinó que s'ompliran fins a límits raonables de seguretat.

1.5. Tancs de doble fons

Els tancs de doble fons, a l'anterior configuració no es feien servir, degut a que el seu efecte sobre el trimat o l'escora és mínim. El problema és que són tancs amb molta poca capacitat i molt distribuïts, cosa que anul·la qualsevol efecte que puguin tenir.

Aquest no és l'únic problema que tenen els tancs de doble fons, s'ha comprovat durant les proves inicials que si aquests tancs estan plens, i el vaixell esta escorat, resulta gairebé impossible buidar-los degut a que la connexió amb el tub que els buida esta localitzat al centre del buc. La geometria dels tancs, i la col·locació del tub de buidar aconseguixen que no es pugui buidar si no és ajustant primer l'escora a 0°.

A2. Renovació i actualització

Els sensors que mesuraven el trimat i l'escora consistien en dos potenciòmetres accionats per un plomall que per efecte de la gravetat anaven girant segons la inclinació del vaixell. El problema relacionat amb aquest tipus de mesura és la poca sensibilitat que ofereixen. Degut a que primer ha de vèncer la resistència de gir del potenciòmetre per arribar a marcar el valor d'inclinació, i molts cops no arribava a marcar el valor real. L'altre problema detectat en la maniobra de control del vaixell era que no es feia seguiment del calat en les maniobres d'estiba, per tant s'havia d'incloure d'alguna forma algun sensor que indiqués el calat del vaixell en temps real.

2.1. Sensor d'ultrasons pel francbord

Per resoldre el problema de que el sistema de control no té en compte el calat en cap moment per controlar l'estabilitat s'ha proposat la instal·lació d'un sensor d'ultrasons a la popa del vaixell que detecta la distància des de la coberta principal fins a la línia de flotació.

El problema de mesurar el calat només a partir del sensor ubicat a popa és que només obtindrem un valor real a la popa del vaixell en condicions de trimat i escora de 0°. Una forma de resoldre aquest problema i poder saber el calat a la part mitja del vaixell és aplicant càlculs trigonomètrics. Coneixent la inclinació del vaixell i la distància en un punt, es pot extrapolar el calat en qualsevol part del vaixell. Aquí es mostra la fórmula per calcular el calat a l'altre extrem del vaixell, a la proa.

Definim les següents variables:

$$\begin{aligned} \text{Calat proa} = w ; \text{Calat popa} = z ; \text{Angle de trimat} = \alpha ; \text{Eslora} = L \\ w = z - (L \cdot \sin \alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

2.1.1. Elecció del sensor d'ultrasons

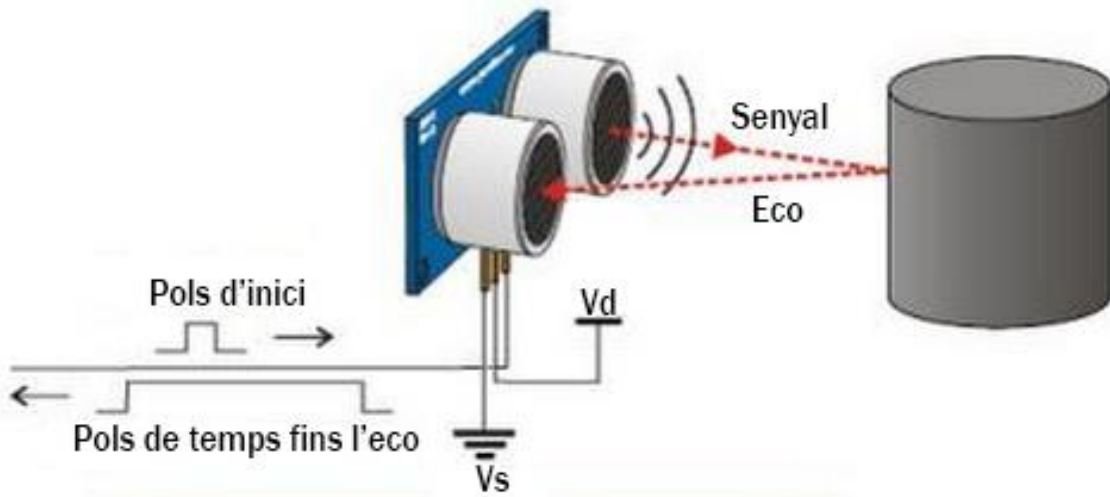
El sensor de nivell dels tancs va ser escollit dins de l'amplia gama de sensors Arduino, ja que aquests són petits dispositius que fan funcions senzilles, són econòmics i molt fàcils de programar. Per tant es va decidir buscar dins de tot el ventall de complements per Arduino quin sensor podia resoldre millor el nostre problema. El sensor escollit va sigut el "Sensor Ultrasònic HC-SR04" que ofereix aquestes característiques tècniques:

Amb aquest sensor, el rang de mesura mínim és de 2 centímetres, suficient per arribar a tots els casos possibles de trimat cap a popa. La prova realitzada amb la maqueta indica que és gairebé impossible arribar a tocar amb l'aigua el sensor ja que la inclinació seria excessiva. El marge superior de 400 centímetres és més que suficient ja que el màxim mesurat sense carregar ni llastrar no supera els 10 centímetres.

2.1.1.1. Funcionament bàsic d'un sensor d'ultrasons

Un sensor d'ultrasons funciona mesurant el temps entre l'enviament i la recepció d'un pols sonor. En aquest cas el pols es enviat per la placa Arduino, i el receptor rep el rebot del pols i amb la diferència de temps es pot saber la distància a la qual es troba l'objecte.

Amb el temps entre que s'ha enviat el pols i la seva recepció amb la velocitat del so es pot conèixer la distància que ha recorregut el pols des de l'emissor fins l'obstacle que ha creat l'eco de la senyal.



Il·lustració 36 – Funcionament del sensor d'ultrasons

2.1.2. Programació del sensor d'ultrasons

Per fer funcionar el sensor d'ultrasons per internet hi ha molts exemples de codi per obtenir la distància en cm a partir de les lectures del sensor. Per tant s'utilitza una part d'aquest codi per resoldre el problema d'enviar el senyal i rebre l'eco i la part del càlcul de la distància fent servir el temps de resposta.

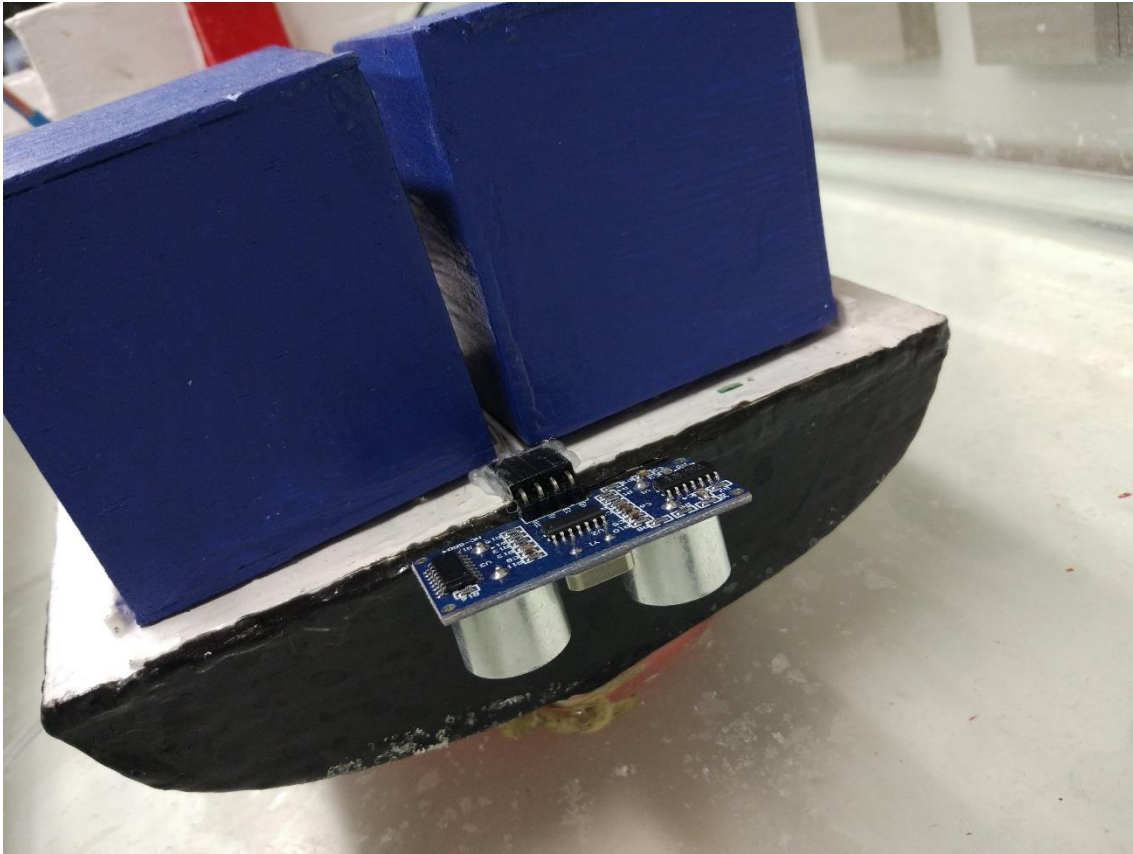
La resta de codi s'utilitza per imprimir en pantalla la lectura del sensor, fer les proves adients per la seva instal·lació i l'activació de les diferents sortides que comunicaran les dades amb el PLC.

2.1.3. Instal·lació del sensor d'ultrasons

La ubicació del sensor d'ultrasons ha de complir uns requisits necessaris perquè la seva instal·lació no comprometi la càrrega de contenidors quan estigui en funcionament i si pot ser aprofitar d'alguna forma el cablejat actual.

L'únic cablejat que es podria aprofitar és el del sensor d'escora que estava ubicat a la part mitja del vaixell i que ha quedat anul·lat per la instal·lació d'un acceleròmetre que realitza la mateixa feina, però el problema és que aquest sensor està enmig de tota la zona de càrrega i es fa complicat poder instal·lar el sensor i que no dificulti les operacions d'estiba. Per això es decideix prescindir d'aquest cablejat i s'escull la popa del vaixell per ser una superfície plana, amb una gran estabilitat i que no es veu afectada pels moviments de la càrrega. El cablejat del sensor d'ultrasons haurà de ser tot nou, però es farà passar per la coberta fins al castell, on està col·locat el sensor d'ultrasons i així els dos cablejats aniran junts i molestaran el mínim possible.

Els cables que fa servir aquest sensor són quatre: Alimentació a 5V, negatiu, sortida digital del puls i entrada digital de l'eco.



Il·lustració 37 – Instal·lació del sensor d'ultrasons

2.1.4. Connexió des de l'Arduino al PLC

Les úniques entrades que han quedat lliures després de l'eliminació dels sensors d'inclinació antics són dues analògiques i unes entrades digitals en desús en l'antic muntatge. Es decideix que les dues entrades analògiques anteriors es facin servir pels resultats de l'acceleròmetre, una entrada analògica pel resultat d'inclinació de l'eix vertical i l'altre per l'horitzontal. Degut a això les dades del sensor d'ultrasons hauran de ser transmeses en format digital, fent servir una entrada per cada valor de distància. Es disposen de 14 entrades digitals, de les quals es faran servir per indicar valors de francbord (que és el que mesura el sensor) compresos entre 2 centímetres que és el mínim i 10 centímetres que supera el valor en pes mort de la maqueta.

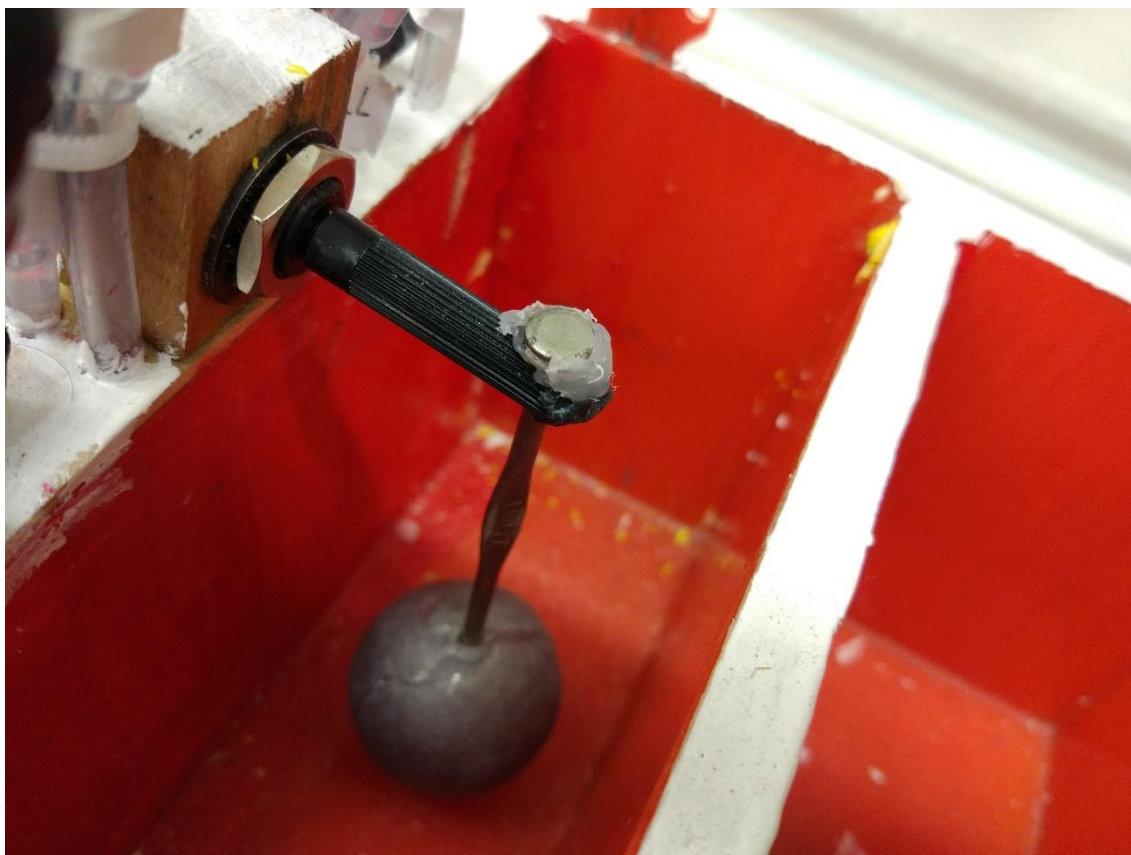
Com al final el controlador no realitzarà accions sobre el calat, es decideix deixar aquest apartat a la memòria però no s'implementarà. Així per futures actualitzacions es té una guia de com procedir.

2.2. Sensor acceleròmetre pel trimat i escora

El principal problema dels sensors construïts amb plomalls i potenciómetres és que aquests sensors no mesuren valors petits, ja que fins casi 3-5° no aconsegueixen mostrar cap canvi en la inclinació del vaixell. Per tant la mesura del trimat era un valor casi imaginari perquè mai arribava a donar valors diferents de 0 tot i estar clarament cap a popa o proa.

Per tant es va decidir canviar aquests dos sensors i posar-ne un de sol que fes les dues funcions i que alhora sigues molt més precís.

Es va decidir que un acceleròmetre seria capaç d'identificar la inclinació del vaixell en tots els eixos, tal i com fan els telèfons mòbils amb una precisió més que suficient pel control d'estabilitat d'una maqueta de vaixell.



Il·lustració 38 – Antic sensor d'escora

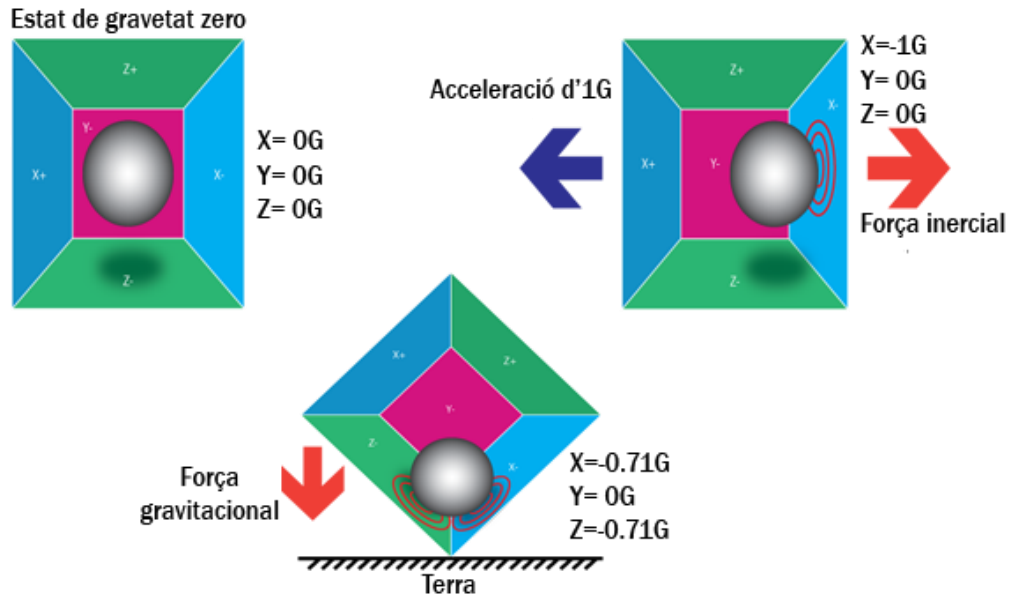
2.2.1. Elecció del sensor acceleròmetre

Per tant seguint la línia es va escollir el sensor “*Giroscopi i acceleròmetre GY-521 MPU6050*” que ofereix segons la pàgina oficial de projectes d'Arduino:

Per tant amb aquest petit sensor tenim a la nostra disposició un acceleròmetre i un giroscopi, tot i que només farem servir l'acceleròmetre ja que ens es més que suficient per la nostra tasca.

2.2.1.1. Funcionament bàsic d'un acceleròmetre

L'acceleròmetre que em triat funciona sobre el principi de l'efecte piezoelèctric. Aquí, cal imaginar un cub amb una petita bola a l'interior. Les parets d'aquesta caixa estan fetes amb cristalls piezoelèctrics. Quan s'inclina la caixa, la pilota es veu obligada a moure's en direcció a la inclinació, a causa de la gravetat. El mur on es col·loca la bola crea petits corrents piezoelèctrics. Hi ha tres parells de parets oposades en un cuboide. Cada parell correspon a un dels eixos de l'espai 3D: X, Y i Z. Segons el corrent produït a cadascuna de les parets piezoelèctriques podem determinar la direcció de la inclinació i la seva magnitud.



Il·lustració 39 – Funcionament acceleròmetre

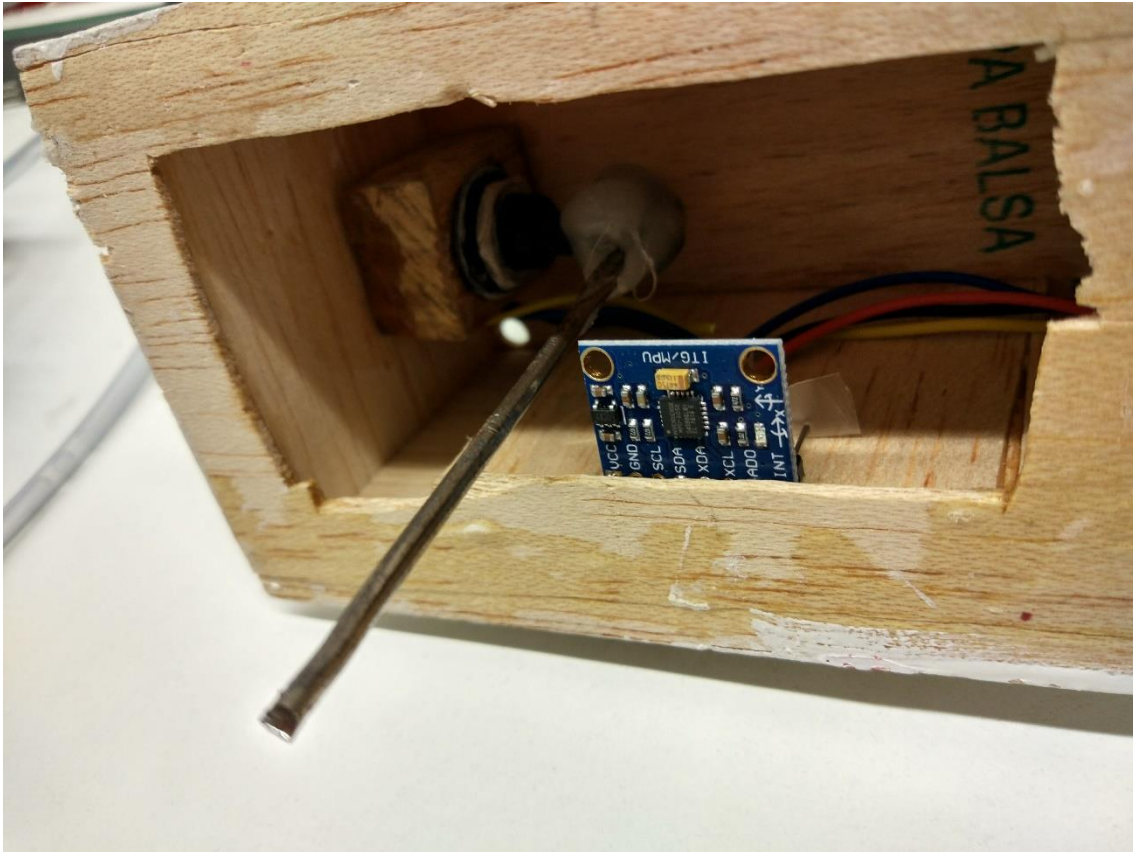
2.2.2. Programació de l'acceleròmetre

La programació de l'acceleròmetre ha estat basada en la informació trobada a diferents pàgines web on mostraven exemples de com fer servir aquest acceleròmetre en concret. Després de provar uns quants exemples i veure quin era el que millor funcionava s'ha optat per adaptar el que millors resultats donava i aplicar-li algunes de les funcions dels altres exemples.

2.2.3. Instal·lació de l'acceleròmetre

Per decidir la ubicació més adient per col·locar l'acceleròmetre es van establir uns paràmetres, el primer era que no s'havia de veure físicament, per tant havia de quedar amagat. El segon requisit era que s'havia de poder aprofitar en el màxim possible tota la distribució de cables ja realitzada pels companys anteriorment. Per tant es va decidir que el millor lloc per col·locar el sensor era dins del castell de popa. Allà dins hi havia ubicat el sensor de trimat, per tant, després de eliminar el sensor anterior, i aprofitant el cablejat en el màxim possible es va decidir instal·lar el sensor a la mampara de popa, i fixar-lo amb silicona calenta.

El sensor anterior utilitzava tres cables, un per l'alimentació positiva, un altre pel negatiu i el tercer per la senyal analògica. En el cas del sensor nou, es necessitaven 4 cables, tres reutilitzats i un nou que havia de ser passat acompanyant a la resta. Els nous cables, que estan connectats a la placa Arduino són: Alimentació a 3.3V, connexió a terra, el pin SCL (pin rellotge) i el pin SDA (pin dades).



Il·lustració 40 – Ubicació de l'acceleròmetre dins del castell de popa

2.2.4. Connexió des de l'Arduino al PLC

Per comunicar l'Arduino i el PLC i transmetre les dades de l'acceleròmetre es faran servir les dues entrades analògiques que estan lliures al PLC i que abans estaven connectades als sensors d'inclinació amb potenciòmetres.

Per poder fer-ho s'aprofitarà la opció que dona l'Arduino de tenir sortides “analògiques”, que en realitat són PWM (*Pulse Wave Modulation*), compreses entre el valor 0 i el valor 255 que és el màxim. L'equivalent en voltatge són 0V i 5V, tot i que el PLC pot suportar tensions molt més elevades, per la funció que volem nosaltres un rang de voltatge més petit també dona bons resultats.

Per fer-ho explicarem el trimat i l'escora per separat així es podrà veure els càlculs que realitza l'Arduino per aconseguir una bona transmissió de la informació.

Escora:

Delimitem l'escora màxima en 25° per banda, un límit molt superior que és impossible d'arribar en condicions normals de operació de la maqueta. Aleshores tenim 255 valors de sortida per 50° de mesura, 25° a estribord i 25° a babord. Per tant, cada grau li pertoquen 5.1 valors de sortida

$$\text{Relació graus i PWM: } 255/50 = 5.1$$

Arrodonim a 5 el valor. Com que els valors de inclinació poden ser positius o negatius, hem de fer que tots siguin positius perquè han d'anar compresos entre 0 i 255. Al ser el valor més petit

-25, i amb la relació de 5 dona -125. Fem servir de marge el valor -127 perquè és la meitat de 255. Així, la conversió dels valors de graus a PWM comprès entre 0 i 255 queda:

$$\text{Sortida PWM} = (\text{Valor Escora} \cdot 5) + 127$$

Així si comprovem els valors màxims i mínims, queden compresos entre 0 i 255

$$\text{Sortida PWM màxima positiva: } (25 \cdot 5) + 127 = 252$$

$$\text{Sortida PWM màxima negativa: } (-25 \cdot 5) + 127 = 2 \quad (4)$$

Els valors de la sortida de la placa Arduino donen sempre entre 0 i 255 així que mai hi haurà problemes de lectura dels valors si els acotem d'aquesta manera.

Trimat:

De la mateixa forma que delimitem l'escora a 25° per banda com a valors màxims, amb el trimat establim que els valors màxims que es poden assolir amb la maqueta estan en 5° cap a proa i 5° cap a popa. La relació entre graus i el valor del PWM està en 25.

$$\text{Relació graus i PWM: } 255/10 = 25.5$$

Arrodonit a 25 el valor ens donarà més seguretat i marge. De la mateixa forma que amb l'escora els valors podien ser negatius o positius, aquí també hem de convertir-los tots en positius sumant la meitat de 255. Així, la conversió dels valors de graus a PWM comprès entre 0 i 255 queda:

$$\text{Sortida PWM} = (\text{Valor Trimat} \cdot 25) + 127$$

Així si comprovem els valors màxims i mínims, queden compresos entre 0 i 255

$$\text{Sortida PWM màxima positiva: } (5 \cdot 25) + 127 = 252$$

$$\text{Sortida PWM màxima negativa: } (-5 \cdot 25) + 127 = 2$$

$$\text{Sortida PWM màxima negativa: } (-5 \cdot 25) + 127 = 2 \quad (5)$$

Els valors dels càlculs entren dins del marge com a l'escora, per tant s'apliquen aquestes correccions a la programació de l'Arduino.

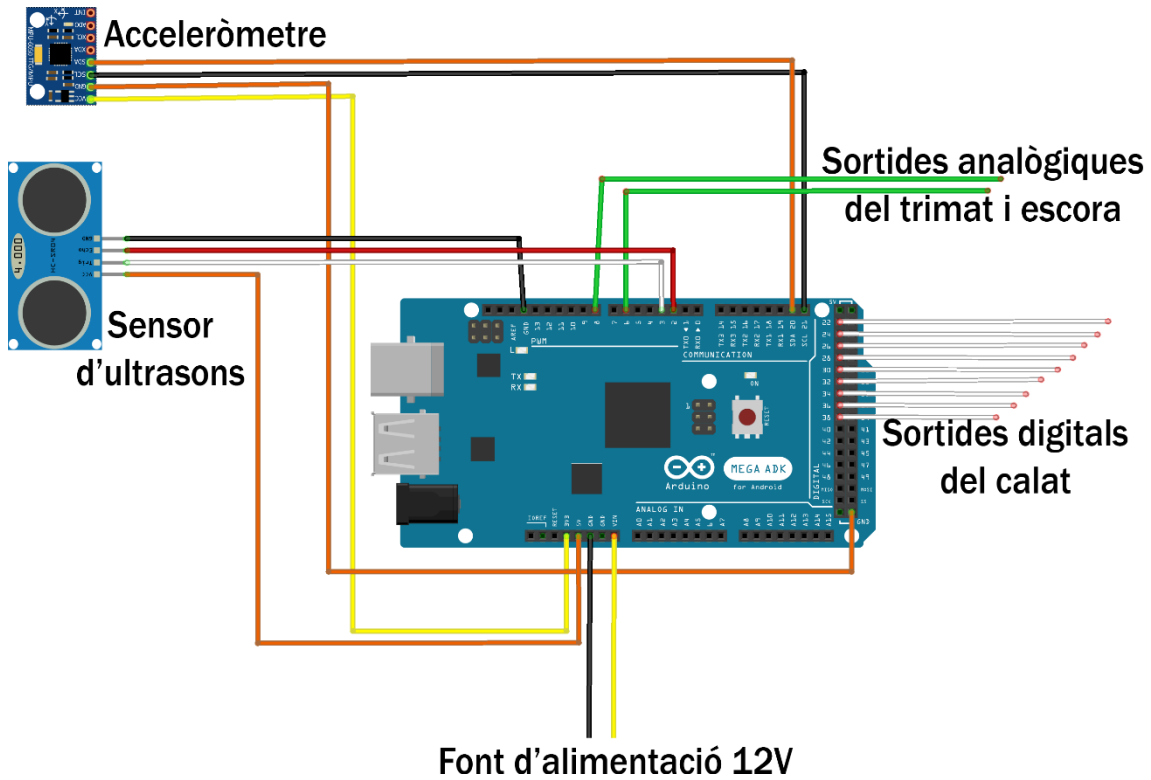
2.3. Esquemes d'ambos sensors i la connexió Arduino-PLC

Una vegada s'ha provat l'efectivitat de les dues programacions per separat, s'ajunten totes les línies de codi i separar-les per poder identificar problemes en cas de que falli o les lectures no siguin les correctes. Al fer servir una placa Arduino MEGA les possibilitats de sortides són molt amples així que no hi ha hagut problema en utilitzar les sortides necessàries per connectar l'Arduino amb el PLC.

Les dades del acceleròmetre, com està explicat al seu apartat són transmeses amb una senyal modulada de 5V i la tolerància de les entrades analògiques de l'Arduino accepten valors entre 0 i +10V, per tant tenim bona acceptació per poder llegir els senyals correctament.

Com les entrades analògiques són poques, per la lectura del sensor d'ultrasons s'ha optat per transmetre les dades de forma digital, utilitzant pins de l'Arduino i entrades digitals al PLC. On

cada pin correspon a un valor concret de calat dins dels marges entre els quals treballa la maqueta.



Il·lustració 41 – Cablejat de l'Arduino per connectar els sensors i el PLC

2.4. Programació de l'Arduino

En aquest apartat està escrita la programació feta servir a l'Arduino en una taula de dos columnes, l'ordre és el següent: primera pàgina, columna esquerra i després la dreta, i per últim la segona pàgina, en el mateix ordre de columnes.

En aquesta programació s'inclou el tractament de dades dels sensors d'ultrasons i acceleròmetre, la sortida dels senyals cap al PLC i la programació que permet recollir les dades en un ordinador per poder-les analitzar.

Estan els diferents apartats separats per colors i per espaiadors d'Arduino (//), així la lectura i comprensió posteriors serà molt més àgil. Tot i això s'adjuntarà tota la documentació informàtica, incloent els arxius d'Arduino per si es volgués treballar més endavant sobre aquesta maqueta.

```

//accelerometre inici
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050.h"
#include "Wire.h"
#include <TimeLib.h>

const int mpuAddress = 0x68;
MPU6050 mpu(mpuAddress);

int ax, ay, az;
int gx, gy, gz;
//accelerometre final

//ultrasons inici
const int EchoPin = 2;
const int TriggerPin = 3;
const int LedPin = 13;
//ultrasons final

//sortides
const int trimat = 6;
const int escora = 8;
const int calatdos = 22;
const int calattres = 24;
const int calatquatre = 26;
const int calatcinc = 28;
const int calatsis = 30;
const int calatset = 32;
const int calatvuit = 34;
const int calatnou = 36;
const int calatdeu = 38;
//sortides

//tancs
int br_1 = 7;
int br_2 = 9;
int er_1 = 11;
int er_2 = 13;

int plc_br1 = 0;
int plc_br2 = 0;
int plc_er1 = 0;
int plc_er2 = 0;
//tancs

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    setTime(17,15,20,15,12,2017);

    //ultrasons
    pinMode(LedPin, OUTPUT);
    pinMode(TriggerPin, OUTPUT);
    pinMode(EchoPin, INPUT);
    //ultrasons

    //sortides
    pinMode(calatdos, OUTPUT);
    pinMode(calattres, OUTPUT);
    pinMode(calatquatre, OUTPUT);
    pinMode(calatcinc, OUTPUT);
    pinMode(calatsis, OUTPUT);
    pinMode(calatset, OUTPUT);
    pinMode(calatvuit, OUTPUT);
    pinMode(calatnou, OUTPUT);
    pinMode(calatdeu, OUTPUT);
    //sortides

    //accelerometre inici
    Wire.begin();
    mpu.initialize();
    Serial.println(mpu.testConnection()      ?
    F("IMU iniciado correctamente") : F("Error
    al iniciar IMU"));
    //accelerometre final
}

void loop() {

    //accelerometre inici
    mpu.getAcceleration(&ax, &ay, &az);

    float accel_ang_x = atan(ax / sqrt(pow(ay,
    2) + pow(az, 2))) * (180.0 / 3.14) - 5;
    float accel_ang_y = atan(ay / sqrt(pow(ax,
    2) + pow(az, 2))) * (180.0 / 3.14);

    Serial.print(F("Trimat : "));
    Serial.println(accel_ang_x);
    Serial.print(F("Escora : "));
    Serial.println(accel_ang_y);
    //accelerometre final

```

```

//tancs
plc_br1 = analogRead(br_1);
plc_br2 = analogRead(br_2);
plc_er1 = analogRead(er_1);
plc_er2 = analogRead(er_2);

Serial.print("Tanc BR_1: ");
Serial.println(plc_br1);
Serial.print("Tanc BR_2: ");
Serial.println(plc_br2);
Serial.print("Tanc ER_1: ");
Serial.println(plc_er1);
Serial.print("Tanc ER_2: ");
Serial.println(plc_er2);
//tancs

//hora
time_t t = now();
/*
Serial.print("Temps Mal: ");
Serial.print(hour(t));
Serial.print(+ ":");
Serial.print(minute(t));
Serial.print(":");
Serial.println(second(t));
//hora*/

//ultrasons
int cm = ping(TriplePin, EchoPin);
Serial.print("Distancia: ");
Serial.println(cm);
//ultrasons
delay(10);

//sortides analogiques
int graus_escora_y;
int escora_PWM;
int trimat_PWM;
int graus_trimat_x;

graus_escora_y = (int) accel_ang_y;
if (graus_escora_y > 25) graus_escora_y =
25;
if (graus_escora_y < -25) graus_escora_y =
-25;

escora_PWM = graus_escora_y * 5 + 127;

graus_trimat_x = (int) accel_ang_x;
if (graus_trimat_x > 5) graus_trimat_x = 5;
if (graus_trimat_x < -5) graus_trimat_x = -
5;
trimat_PWM = graus_trimat_x * 25 + 127;
analogWrite(escora, escora_PWM);
analogWrite(trimat, trimat_PWM);

//sortides anaogiques - sortides digitals
if (cm == 2) digitalWrite(calatdos, HIGH);
if (cm == 3) digitalWrite(calattres, HIGH);
if (cm == 4) digitalWrite(calatquatre,
HIGH);
if (cm == 5) digitalWrite(calatcinc, HIGH);
if (cm == 6) digitalWrite(calatsis, HIGH);
if (cm == 7) digitalWrite(calatset, HIGH);
if (cm == 8) digitalWrite(calatvuit, HIGH);
if (cm == 9) digitalWrite(calatnou, HIGH);
if (cm == 10) digitalWrite(calatdeu, HIGH);
//sortides digitals
}
int ping(int TriggerPin, int EchoPin) {
    long duration, distanceCm;

    digitalWrite(TriggerPin, LOW);
    delayMicroseconds(4);
    digitalWrite(TriggerPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(TriggerPin, LOW);
    duration = pulseIn(EchoPin, HIGH);
    distanceCm = duration * 10 / 292 / 2;
    return distanceCm;
}

```

Taula 3 – Programació Arduino

A3.Posada en marxa dels nous sensors

Un cop connectats tots els sensors al PLC i comprovat que poden ser llegits pel programa del PLC, el següent pas és adaptar la programació per llegir els valors del nou sensor. Modificant amb els nous valors els blocs, aconseguim establir la senyal analògica en graus.

El procés comença amb la lectura del voltatge d'entrada, en un valor de quatre dígits, que és el que estableix el PLC. El primer pas és forçar l'Arduino perquè estableixi uns valors concrets d'angle, en aquest cas es fan les proves de 5° en 5°. En el cas de l'escora des de -25° fins a 25°, en el cas del trimat des de -5° fins a 5°. A la següent taula podem observar la relació entre els graus, el valor de la sortida de l'Arduino (amb valors compresos entre 0 i 255) i la lectura del PLC.

Graus d'escora	Valors Arduino (0-255)	Valors llegits al PLC
-25	2	109
-20	27	1370
-15	52	2873
-10	77	4227
-5	102	5558
0	127	7011
5	152	8310
10	177	9661
15	202	10839
20	227	12587
25	252	13735

Taula 4 – Relació de valors d'escora entre la realitat, l'Arduino i el PLC

També es realitzen les mateixes comprovacions amb els valors del trimat, tot i que a la programació existent a dins del PLC no existeix cap bloc que processi els valors de trimat. Com a la nova programació la sensibilitat del sensor si que donarà suficient certesa com per poder controlar aquest valor, es realitza la mateixa prova per utilitzar-la més endavant.

Graus de trimat	Valors Arduino (0-255)	Valors llegits pel PLC
-5	2	153
0	127	6884
5	252	13779

Taula 5 – Relació de valors de trimat entre la realitat, l'Arduino i el PLC

Es pot veure clarament que els valors de sortida de l'Arduino coincideixen entre l'escora i el trimat, això es degut a fer servir els mateixos números però a l'inrevés durant la conversió entre els graus i els valors de sortida de l'Arduino.

L'altre efecte que és visible si es comparen les dos taules és que tot i que les sortides de l'Arduino són les mateixes, els valors llegits pel PLC no coincideixen plenament. Això és degut a que el senyal que surt de l'Arduino no és un valor de voltatge concret, sinó que fa servir les sortides PWM de l'Arduino i amb la diferencia de freqüències entre l'Arduino i el PLC les lectures poden variar sense ser significatives durant tot el registre.

Els valors es comprenen aproximadament entre 100 i 14000 pel mínim i màxim respectivament. El valor on hi ha més diferència és al valor 0, on varia entre 7011 i 6884. Calcularem el percentatge d'error per veure si es assumible o calen futures modificacions.

$$\%_{error} = \frac{7011 - 6884}{7011} \cdot 100 = 1.8\% \quad (6)$$

Com podem veure un percentatge d'error del 1.8% en una escala de 50° com a màxim en el cas de l'escora, ens dona una desviació que mai supera el grau, i això com a límit. Així que donem per correctes aquests resultats.

El següent pas és calibrar les funcions que interpreten el valor analògic llegit pel PLC i el transformen en graus, que és com es transforma una lectura analògica en una variable interna del PLC. Aquests blocs són els de *NORM_X* i *SCALE_X*, a la següent taula es mostren els valors anteriors, que s'extreien dels sensors vells i els nous que provenen de la taula anterior d'on s'han extret els valors. Es poden veure els valors anteriors i els actuals per comparar la precisió dels dos sistemes, ells feien servir un ventall de 3798 (7474-3676) valors analògics de lectura i els convertien a 90° (45°+45°) i amb el nou sistema s'utilitzen 13626 valors de lectura analògica per 50° d'escora entre babord i estribord.

Els blocs *NORM_X* llegeixen un valor i el comparen entre un mínim i un màxim, i a la sortida ens donen un valor entre 0 i 1 decimal que correspon al valor percentual entre el mínim i el màxim.

Els blocs *SCALE_X* realitzen una funció semblant, comparen el valor d'entrada entre 0 i 1, i amb les dades de mínim i màxim l'escalen perquè percentualment s'estableixi entre els valors establerts.

Funció	Escora				Trimat			
	Mínim		Màxim		Mínim		Màxim	
	Antic	Nou	Antic	Nou	Antic	Nou	Antic	Nou
NORM_X	7474	109	3676	13735	3676	153	25863	13779
SCALE_X	-45	-25	45	25	-90	-5	90	5

Taula 6 – Comparació de valors entre sensors d'escora i trimat

Com es pot observar, a l'antiga programació estava la possibilitat d'arribar a 45° d'escora i a 90° de trimat, uns valors molt elevats i impossibles d'arribar. En canvi amb la nova metodologia s'ha acotat el marge dins d'uns valors raonables.

A4. Esquemes hidràulics i elèctrics

